

Malé vodní elektrárny ve vodárenském systému

Small Hydro Power Plants in Water Supply System

Ing. Martin Král

Disertační práce

Školitel: prof. Ing. Radomír Goňo, Ph.D.

Ostrava, 2021

Poděkování

Děkuji školiteli prof. Ing. Radomíru Goňovi, Ph.D. za cenné rady, které mi poskytl během vypracování této práce.

Anotace

Státní energetická koncepce byla schválena vládou České republiky v květnu 2015. Koncepcí jsou definovány priority a žádané cíle České republiky v sektoru energetiky, popisuje realizační nástroje energetické politiky státu. Koncepce udává výhled do roku 2040. Potřeba hledat nové alternativní zdroje energie a zlepšit již známé obnovitelné zdroje energie je více naléhavá. Neustále obnovujícím se zdrojem energie je koloběh vody v přírodě. Nejběžnějším způsobem jeho použití je přeměna energie toku vody na elektrickou energii. Takto získaná energie se jeví jako nejekonomičtější, výroba je navíc ekologicky čistá. Dvacáté století nenávratně poznamenalo podobu země velkými vodními díly, jejichž realizace jak již nyní víme, nebyla ve všech případech nutná. Pokud jde o životní prostředí, nyní se vracíme k „malým vodním plochám“. Malé vodní elektrárny se zaručeným výkonem a výrobou energie představují v souhrnu velký energetický zdroj, mohou tedy snížit výrobu elektrické energie tuhými, plynými a kapalnými palivy, která díky spalování škodí životnímu prostředí. Většina hydroenergetického potenciálu, který lze ještě využít, je soustředěn do menších toků, kde pro výstavbu vodních elektráren nad 10 MW, již nezbývá mnoho místa a nejsou zde ani vhodné podmínky pro provoz. Uvažuje se tedy především o výstavbě přečerpávacích vodních elektráren, výstavba tohoto typu vodních elektráren je však velice nákladná. Nabízí se tedy možnost využití hydroenergetického potenciálu mimo volné vodní toky. Tato disertační práce se zabývá analýzou problematiky a řešení umístění malých vodních elektráren do vodárenských systémů.

Klíčová slova

Malá vodní elektrárna, vodárenský systém, generátor, turbína, elektrická ochrana, měření veličin, realizace a návrh malé vodní elektrárny.

Annotation

The State Energy Concept was approved by the Government of the Czech Republic in May 2015. The concept defines the priorities and desired goals of the Czech Republic in the energy sector, describes the implementation tools of the state's energy policy. The concept sets a perspective for 2040. The need to look for new alternative energy sources and to improve already known renewable energy sources is more urgent. The constantly renewing source of energy is the water cycle in nature. The most common way to use it is to convert the energy of the water flow into electricity. The energy obtained in this way seems to be the most economical, and the production is also ecologically clean. The twentieth century has irreversibly marked the shape of the earth with large bodies of water, the realization of which, as we already know, was not necessary in all cases. When it comes to the environment, we are now returning to 'small areas of water'. Small hydro power plants with guaranteed output and energy production represent in summary a large source of energy, so they can reduce the production of electricity by solid, gaseous and liquid fuels, which are harmful to the environment due to combustion. Most of the hydro power potential that can still be used is concentrated in smaller streams, where there is not much space left for the construction of hydro power plants above 10 MW and there are no suitable conditions for operation. Therefore, the construction of pumped storage hydro power plants is being considered, but the construction of this type of hydro power plant is very expensive. It is therefore possible to use the hydro power potential outside free watercourses. This dissertation deals with the analysis of problems and solutions for the location of small hydro power plants in water systems.

Keywords

Small hydro power plant, water supply system, generator, turbine, electrical protection, measurement of values, implementation and design of a small hydro power plant.

Seznam zkratk a symbolů

ASM	asynchronní motor
ATS	automatická čerpací stanice
BRKO	biologicky rozložitelné komunální odpady
ČOV	čistírna odpadních vod
ČS	čerpací stanice
ČT	čerpadlo v turbínovém režimu
DS	distribuční soustava
ES	elektrizační soustava
FVE	fotovoltaická elektrárna
JE	jaderná elektrárna
MVE	malá vodní elektrárna
nn	nízké napětí (úroveň elektrického napětí)
NT	nízký tarif dodávky elektrické energie
OP	ostrovní provoz výroby elektrické energie
OZ	obnovitelné zdroje elektrické energie
PDS	provozovatel distribuční soustavy
PE	parní elektrárna
PID	PID regulace
PPE	paroplynová elektrárna
PVE	přečerpávací elektrárna
PSE	plynová a spalovací elektrárna
ÚV	úpravna vody
VDJ	vodojem
VE	vodní elektrárna
vn	vysoké napětí (úroveň elektrického napětí)
VT	vysoký tarif dodávky elektrické energie
VTE	větrná elektrárna

D	průměr	m
E	měrná energie	$J \cdot kg^{-1}$
H	hrubý spád	m
I	proud	A
L	indukčnost	H
P	činný výkon	W
R	odpor	Ω
Q	průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
U	napětí	V

W	elektrická práce	J
f	frekvence	Hz
g	gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
n	otáčky	min^{-1}
n_s	specifické otáčky	min^{-1}
p	tlak	Pa
ρ	měrná hmotnost	$kg \cdot m^{-3}$
η	účinnost	-
η_d	účinnost dýzy	-
η_h	hydraulická účinnost	-
η_m	mechanická účinnost	-
η_t	účinnost turbíny	-
η_v	objemová účinnost	-

OBSAH

1	ÚVOD.....	9
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	10
3	OBNOVITELNÉ ZDROJE V ČR	11
4	HYDROENERGETIKA.....	17
4.1	Turbíny přetlakové a rovnotlaké	17
4.2	Rozdělení turbín podle průtoku vody oběžným kolem	18
4.3	Rozdělení turbín podle měrné energie a výkonu.....	19
4.4	Nejpoužívanější vodní turbíny.....	22
5	VODÁRENSTVÍ.....	30
5.1	Systémy zásobování vodou.....	30
5.2	Tlakové poměry při dopravě vody – tlaková pásma	32
5.3	Armatury vodovodních potrubí.....	36
6	PROBLEMATIKA EKOLOGIE, VÝSTAVBY A PROVOZU MVE	39
6.1	MVE a životní prostředí	39
6.2	Právní předpisy pro výstavbu MVE	42
6.3	Provoz a údržba MVE	42
7	VÝBĚR VHODNÉHO UMÍSTĚNÍ MVE.....	43
7.1	Realizace MVE ve vodárenských objektech	43
7.2	Posouzení vhodnosti umístění MVE	46
8	PŘIPOJENÍ K SÍTÍ PROVOZOVATELE DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY	50
9	NÁVRH STROJNÍ ČÁSTI MVE.....	52

9.1	Turbína	52
9.2	Generátor	59
10	NÁVRH ELEKTRICKÉ ČÁSTI MVE.....	69
10.1	Regulace MVE pro snížení ztrát netěsnostmi a poruchami ve vodovodním řadu	69
10.2	Ochrany MVE podle normy ČSN 33 3051	71
10.3	Ochrany MVE podle pravidel provozovatele	74
10.4	Pomocná aplikace pro výběr vhodného chránění MVE	78
	ZÁVĚR.....	80
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	82
	SEZNAM PUBLIKACÍ, PROJEKTŮ A ÚČASTI NA SOUTĚŽÍCH	85
	SEZNAM OBRÁZKŮ	88
	SEZNAM TABULEK	90
	SEZNAM PŘÍLOH	91

1 Úvod

Potřeba hledat nové, alternativní energetické zdroje a zdokonalovat obnovitelné zdroje již známé je stále naléhavější. Neustále se obnovujícím zdrojem energie je koloběh vody v přírodě. Nejběžnější způsob jeho využívání představuje přeměna energie vodního toku v energii elektrickou. Právě takto získaná energie se jeví jako ekonomicky nejvýhodnější, přičemž způsob její výroby je navíc ekologicky čistý. Dvacáté století poznamenalo nevratně tvář země velkými vodními díly, jejichž realizace, jak dnes víme, nebyly ve všech případech nutné. Nyní se s ohledem na životní prostředí vracíme zpět k „malým vodám“. Malé vodní elektrárny se zaručeným výkonem a vyráběnou energií představují v souhrnu velký energetický zdroj a mohou tak ušetřit mnoho tuhých, plyných a kapalných paliv, jejichž spalování škodí životnímu prostředí [2].

Problémem dalšího rozvoje vodních elektráren je skutečnost, že většina vhodných a ekonomicky efektivních lokalit již byla obsazena. Proto je výzvou najít nová technologická řešení, která by umožnila výstavbu na zatím z tohoto důvodu neobsazených lokalitách [5].

Malé vodní elektrárny, které jsou provozovány na vodních tocích, se poslední léta setkávají s méně vodními roky, tato tendence klesajících průměrných průtoků negativně ovlivňuje provoz těchto malých vodních elektráren. Dá se předpokládat, že tato negativní tendence bude stále pokračovat.

Odpovědí na výše zmíněné poklesy provozních hodin malých vodních elektráren umístěných na vodních tocích jsou malé vodní elektrárny ve vodárenských systémech. Naopak oproti vodním tokům se využívání vody ve vodárenských systémech stále zvyšuje. Z tohoto pohledu jsou zde tedy pozitivní výhledy do budoucnosti využívání malých vodních elektráren ve vodárenských systémech.

Ve vodovodních systémech se využívají redukční prvky, které marní energii vody bez užitku za účelem snížení tlaků, či průtoků ve vodovodních řadech. Malá vodní elektrárna umístěna na pozici redukčních prvků je schopna využít energii vody a přeměnit ji na elektrickou energii, kterou mohou být poté zásobovány náročné provozy v objektech vodárenských systémů.

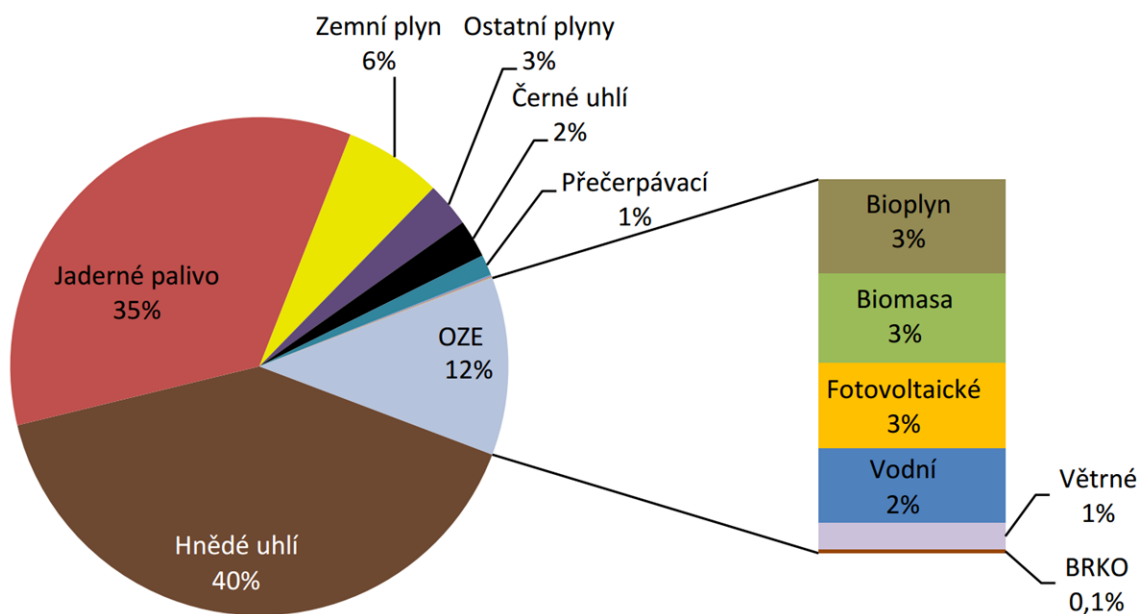
2 Cíle disertační práce

Souhrnným cílem disertační práce je vytvoření metodiky pro návrh malých vodních elektráren (MVE) ve vodárenských objektech. Tento souhrnný cíl je níže rozčleněn do jednotlivých kroků.

1. Teoretický rozbor MVE se zaměřením na vodárenské objekty:
 - Obnovitelné zdroje elektrické energie (v ČR),
 - hydroenergetika,
 - vodárenství.
2. Podpora MVE využitelná ve vodárenství:
 - Právní předpisy pro výstavbu MVE,
 - problematika ekologie,
 - podpora výroby elektrické energie produkované MVE.
3. Analýza stávajících MVE ve vodárenských objektech:
 - Měření elektrických veličin,
 - měření neelektrických veličin,
 - doporučení pro připojení MVE do elektrizační soustavy, požadavky na kvalitu dodávané elektrické energie.
4. Vytvoření podpory pro tvorbu konkrétních projektů:
 - Vytvoření pomocného softwaru pro výběr vhodné turbíny MVE,
 - ověření funkčnosti softwaru na skutečných datech,
 - vytvoření modelu asynchronního stroje, využitého jako generátoru v MVE,
 - vytvoření pomocného softwaru pro výběr ochran.
5. Vytvoření metodiky pro výběr vhodného umístění MVE ve vodovodním řádu:
 - Vytvoření metodiky hodnotící vhodnost umístění MVE s ohledem na tlakové a výškové poměry,
 - zhodnocení působení MVE na vodárenský systém.

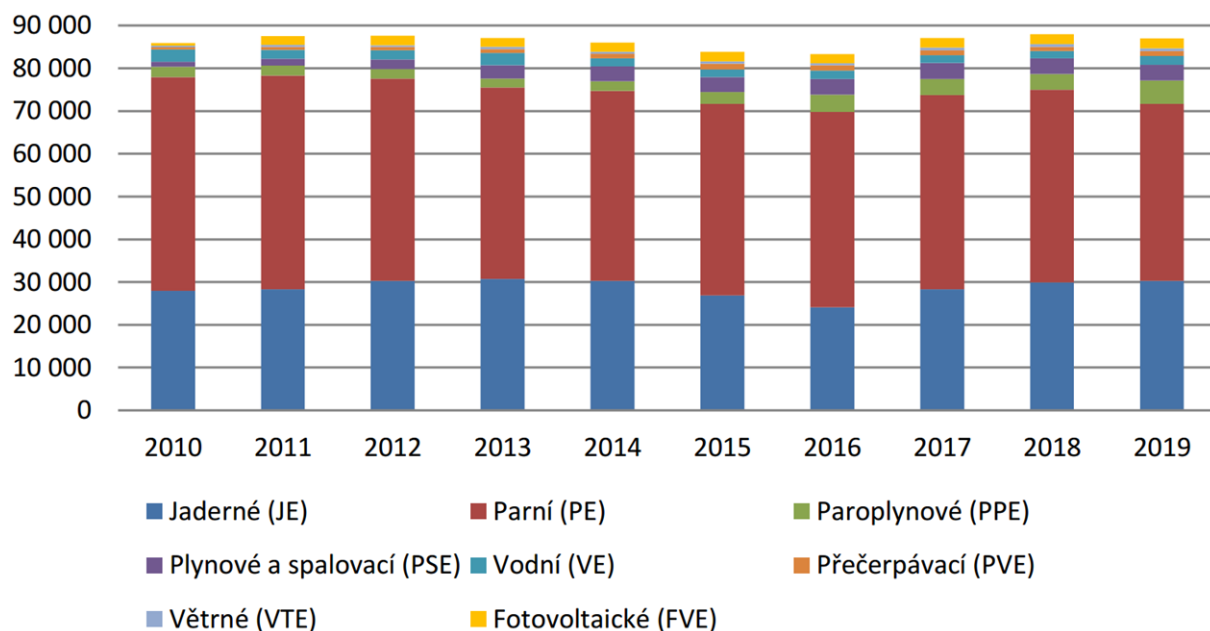
3 Obnovitelné zdroje v ČR

Podíly na výrobě



Obr. 1 – Podíly na výrobě elektrické energie v ČR [3]

Celková výroba elektřiny brutto v roce 2019 dosáhla téměř hodnoty 87,0 TWh, což představuje meziroční pokles o 1 TWh (- 1,1 %) proti roku 2018. Nejvíce elektřiny bylo vyrobeno v lednu: 8,6 TWh, což bylo způsobeno mimo jiné vyšší spotřebou v souvislosti s chladnějším počasím. Největší meziroční relativní změnu výroby elektřiny brutto zaznamenaly paroplynové elektrárny, které vyrobily meziročně o 1,8 TWh více (+ 49,5 %). Výroba elektřiny brutto naopak nejvíce klesla v parních elektrárnách o 3,7 TWh (- 8,2 %) a jejich instalovaný výkon poklesl na hodnotu 10,7 GW, což je pokles o 0,3 GW (- 3,1 %). Výroba elektřiny brutto z hnědého uhlí poklesla o 2,6 TWh (- 6,8 %), výroba z černého uhlí meziročně klesla o 0,9 TWh (- 26,8 %). Výroba elektřiny ze zemního plynu vzrostla oproti roku 2018 o 2,0 TWh (+ 58,1 %). Výroba elektřiny ve vodních elektrárnách vzrostla meziročně o 0,4 TWh (+23,4 %) [3].

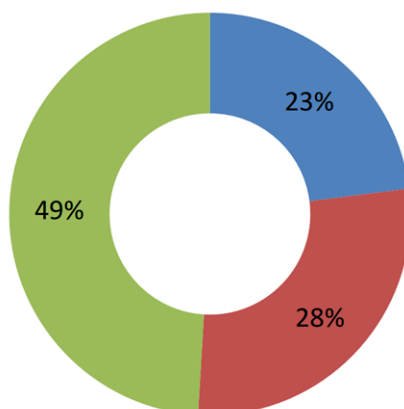


Obr. 2 - Vývoj výroby elektřiny brutto (GWh) [3]

V Tab. 1 je zobrazena roční bilance elektřiny vodních elektráren. Podíl jednotlivých kategorií je poté znázorněn na Obr. 3.

Tab. 1 – Přehled roční bilance elektřiny dle kategorií VE [3]

	Celkový instalovaný výkon	Výroba elektřiny brutto	Technologická spotřeba vlastní výroby elektřiny	Výroba elektřiny	Dodávka elektřiny do ES
	(MW _e)	(MWh)	(MWh)	(MWh)	(MWh)
Vodní elektrárny	1 093,7	2 008 028,7	16 099,7	1 991 929,0	1 909 107,5
Do 1 MW	156,9	461 387,7	5 368,2	456 019,5	418 235,7
1 MW - 10 MW	184,0	561 637,5	6 673,5	554 964,0	528 545,8
Od 10 MW	752,8	985 003,6	4 058,0	980 945,6	962 326,1

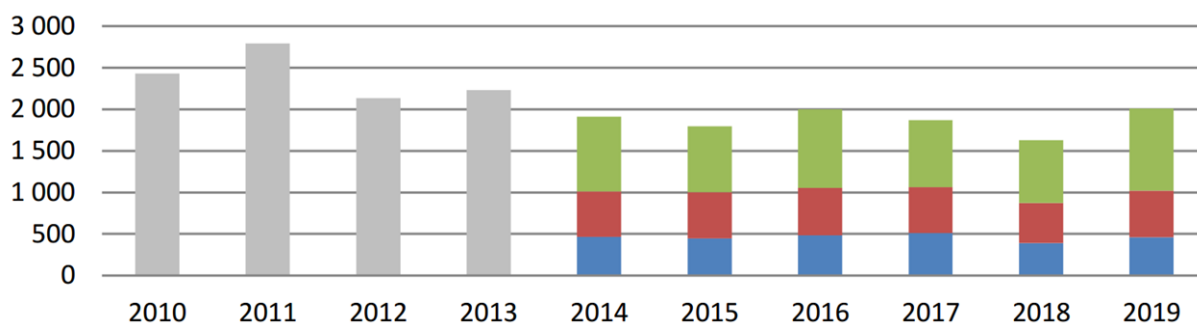


Obr. 3 - Podíl kategorií na brutto výrobě [3]

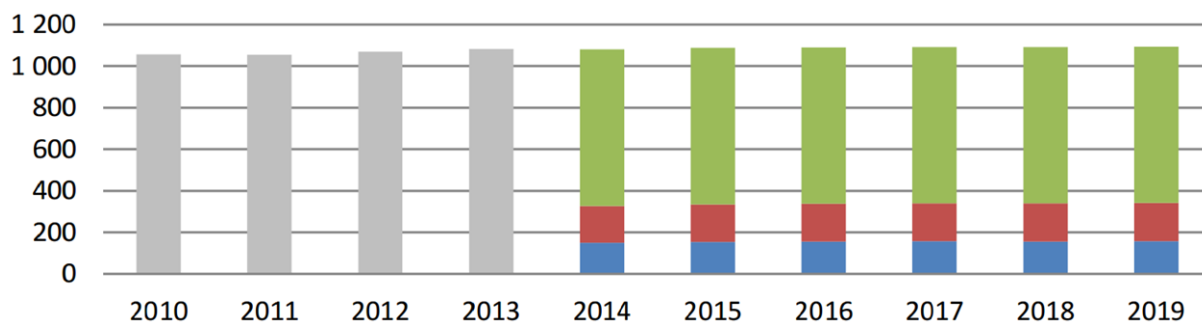
— vodní elektrárny nad 10 MW, — vodní elektrárny 1 MW až 10 MW,
— vodní elektrárny do 1 MW

Na Obr. 4 je znázorněn vývoj vyrobené brutto elektřiny vodními elektrárnami v minulosti, zobrazené údaje jsou zobrazeny v GWh.

Na Obr. 5 je možné vidět vývoj instalovaného výkonu vodních elektráren, uvedená data jsou zobrazena v MW.



Obr. 4 – Vývoj výroby elektřiny brutto VE v GWh [3]



Obr. 5 - Vývoj instalovaného výkonu VE v MW [3]

Výroba elektřiny brutto z obnovitelných zdrojů vzrostla meziročně o 619 GWh (+ 6,6 %) a poprvé tak překročila hranici 10 TWh. Klesala výroba elektřiny z fotovoltaických elektráren o 54 GWh (- 2,3

%), zatímco jejich instalovaný výkon se téměř nezměnil. Rovněž klesla výroba elektřiny z bioplynu o 80 GWh (- 3,1 %). Naopak u ostatních obnovitelných zdrojů výroba elektřiny vzrostla oproti roku 2018 nejvíce u velkých vodních elektráren o 231 GWh (+ 30,7 %) a malých vodních elektráren o 149 GWh (+ 17,1 %), což bylo způsobeno příznivějšími hydrometeorologickými podmínkami. U větrných elektráren vzrostla výroba elektřiny o 91 GWh (+ 14,9 %) při nárůstu instalovaného výkonu o 23,2 MW (+ 7,3 %), u biomasy o 277 GWh (+ 13,1 %) a u biologicky rozložitelného komunálního odpadu o 5 GWh (+ 4,6 %) [3].

Tab. 2 – Výroba brutto elektřiny v GWh [3]

Druh elektráren	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Brutto výroba (GWh)	85 900,1	87 560,6	87 573,7	87 064,9	86 003,4	83 888,3	83 301,9	87 037,6	88 000,3	86 988,7
Jaderné	27 988,2	28 282,6	30 324,2	30 745,3	30 324,9	26 840,8	24 104,2	28 339,6	29 921,3	30 246,2
Parní	49 979,7	49 973,0	47 261,0	44 737,0	44 419,3	44 816,5	45 704,1	45 431,7	45 070,8	41 386,7
Paroplynové	2 349,6	2 344,4	2 200,4	2 092,8	2 204,7	2 749,0	4 049,2	3 722,4	3 690,9	5 518,5
Plynové a spalovací	1 250,8	1 610,7	2 234,7	3 179,6	3 494,4	3 574,7	3 613,9	3 719,6	3 690,4	3 676,7
Vodní	2 789,4	2 134,1	2 231,5	2 856,4	1 909,2	1 794,8	2 000,5	1 869,5	1 627,4	2 008,0
Přečerpávací	591,2	700,9	731,4	905,3	1 051,5	1 276,0	1 201,5	1 170,5	1 050,6	1 166,7
Větrné	335,5	396,8	417,3	478,3	476,5	572,6	497,0	591,0	609,3	700,0
Fotovoltaické	615,7	2 118,0	2 173,1	2 070,2	2 122,9	2 263,8	2 131,5	2 193,4	2 339,7	2 285,9

Tuzemská brutto spotřeba elektřiny od roku 2015 do 2018 rostla na 73,9 TWh a byla nejvyšší za posledních deset let.

Tab. 3 – Brutto spotřeba v GWh [3]

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Brutto spotřeba (GWh)	70 961	70 516	70 453	70 177	69 622	71 014	72 418	73 818	73 941	73 931

Současná legislativa podpory

Zákon č. 165/2012 Sb.

Dne 23. dubna 2009 byla vydána Směrnice Evropského parlamentu a rady 2009/28/ES o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů a o změnách a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES. Cílem této směrnice je stanovení závazných cílů 20 % podílu elektrické energie z obnovitelných zdrojů na hrubé spotřebě elektrické energie do roku 2020 pro členské sáty. [21]

Tuto směrnici implementovala Legislativa České republiky do aktuálního zákona č. 165/2012 Sb. (Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů). Cíle tohoto zákona jsou shrnuty pro obnovitelné zdroje do Národního akčního plánu pro obnovitelné zdroje. Cílem zákona č. 165/2012 Sb. je pro zdroje elektrické energie stanovení národního cíle 15,2 % podílu elektrické energie z obnovitelných zdrojů na hrubé spotřebě elektrické energie do roku 2020, při očekávané spotřebě elektrické energie pro rok 2020 74,1 TWh je to tedy přibližně 11,4 TWh. [1]

Formy podpory výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů

Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 3/2019 ze dne 26. září 2019, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie

Energetický regulační úřad podle § 2c zákona č. 265/1991 Sb., o působnosti orgánů České republiky v oblasti cen, ve znění pozdějších předpisů, § 17 odst. 6 písm. d) zákona č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů, a podle § 1 odst. 3, § 4, § 5, § 6, § 12, § 24, § 26 a § 54 zákona č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů (dále jen „zákon o podporovaných zdrojích energie“), vydává cenové rozhodnutí, kterým se stanoví výkupní ceny a zelené bonusy pro podporované zdroje energie [21].

Výkupní ceny a zelené bonusy na elektřinu

Pro elektřinu vyrobenou z obnovitelných zdrojů energie platí podmínky, které jsou uvedeny v dokumentu [21], tyto podmínky vycházejí z následujících vyhlášek:

- Vyhláška č. 9/2016 Sb., o postupech registrace podpor u operátora trhu a provedení některých dalších ustanovení zákona o podporovaných zdrojích energie (registrační vyhláška).
- Vyhláška č. 145/2016 Sb., o vykazování elektřiny a tepla z podporovaných zdrojů a k provedení některých dalších ustanovení zákona o podporovaných zdrojích energie, ve znění pozdějších předpisů (vyhláška o vykazování energie z podporovaných zdrojů).
- Vyhláška č. 82/2011 Sb., o měření elektřiny a o způsobu stanovení náhrady škody při neoprávněném odběru, neoprávněné dodávce, neoprávněném přenosu nebo neoprávněné distribuci elektřiny, ve znění pozdějších předpisů.
- Vyhláška č. 408/2015 Sb., o Pravidlech trhu s elektřinou, ve znění pozdějších předpisů.

Tab. 4 - Výkupní ceny a roční zelené bonusy na elektřinu pro malé vodní elektrárny [21]

ř./sl.	Podporovaný druh energie	Datum uvedení výroby do provozu		Jednotarifní pásmo provozování		Dvoutarifní pásmo provozování	
		od (včetně)	do (včetně)	Výkupní ceny [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]	Zelené bonusy [Kč/MWh]	
						VT	NT
	a	b	c	j	k	n	o
100	Malá vodní elektrárna ve stávajících lokalitách	-	31.12.2004	2 239	1 294	1 370	1 255
101		1.1.2005	31.12.2013	2 870	1 925	2 140	1 817
102		1.1.2014	31.12.2014	2 814	1 869	-	-
103		1.1.2015	31.12.2015	2 759	1 814	-	-
104		1.1.2016	31.12.2016	2 705	1 760	-	-
105		1.1.2017	31.12.2017	2 349	1 404	-	-
106		1.1.2018	31.12.2018	2 303	1 358	-	-
107		1.1.2019	31.12.2019	2 258	1 313	-	-
108		1.1.2020	31.12.2020	2 214	1 269	-	-
110	Rekonstruovaná malá vodní elektrárna	-	31.12.2013	2 870	1 925	2 140	1 817
111		1.1.2014	31.12.2014	2 814	1 869	-	-
112		1.1.2015	31.12.2015	2 759	1 814	-	-
113		1.1.2016	31.12.2016	2 705	1 760	-	-
114		1.1.2017	31.12.2017	2 349	1 404	-	-
115		1.1.2018	31.12.2018	2 303	1 358	-	-
116		1.1.2019	31.12.2019	2 258	1 313	-	-
117		1.1.2020	31.12.2020	2 214	1 269	-	-
120	Malá vodní elektrárna v nových lokalitách	1.1.2006	31.12.2007	3 189	2 244	2 470	2 130
121		1.1.2008	31.12.2009	3 375	2 430	-	-
122		1.1.2010	31.12.2010	3 668	2 723	-	-
123		1.1.2011	31.12.2011	3 586	2 641	2 650	2 726
124		1.1.2012	31.12.2012	3 737	2 792	-	-
125		1.1.2013	31.12.2013	3 711	2 766	-	-
126		1.1.2014	31.12.2014	3 638	2 693	-	-
127		1.1.2015	31.12.2015	3 567	2 622	-	-
128		1.1.2016	31.12.2016	3 322	2 377	-	-
129		1.1.2017	31.12.2017	2 909	1 964	-	-
130		1.1.2018	31.12.2018	2 852	1 907	-	-
131		1.1.2019	31.12.2019	2 796	1 851	-	-
132		1.1.2020	31.12.2020	2 741	1 796	-	-

VT - pásmo platnosti vysokého tarifu stanovené provozovatelem distribuční soustavy v délce 8 hodin denně,
 NT - pásmo platnosti nízkého tarifu platné v době mimo pásmo platnosti VT

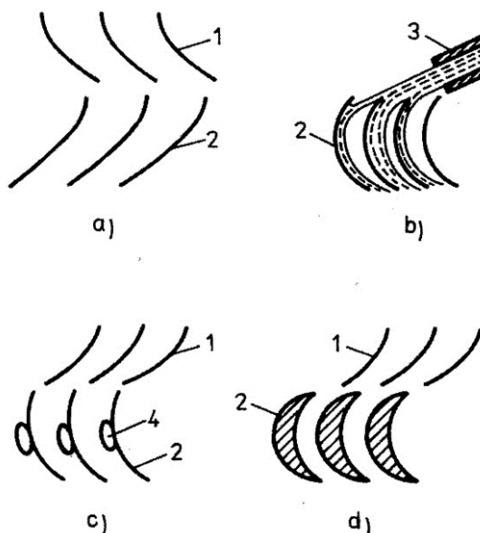
4 Hydroenergetika

4.1 Turbíny přetlakové a rovnotlaké

Podle způsobu přenosu energie vody se rozlišují turbíny přetlakové a rovnotlaké, viz Obr. 6. U přetlakových turbín je část tlakové měrné energie v zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu přeměněna v kinetickou měrnou energii a zbývající (zpravidla větší) část tlakové měrné energie se mění v měrnou energii kinetickou při průchodu vody oběžným kolem. Označení vyplývá z toho, že se průtok oběžným kolem uskutečňuje, jak je zřejmé z Obr. 6a, působením přetlaku na vstupu do oběžného kola. Přetlakové turbíny se označují rovněž jako turbíny reakční, neboť v kanálech oběžného kola dochází při urychlování proudu vody k reakčnímu působení oběžné lopatky.

Jestliže se celá hodnota tlakové měrné energie mění v zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu v kinetickou měrnou energii, potom je na vstupu a výstupu oběžného kola stejný tlak (Obr. 6b, c). Jde tedy o turbínu rovnotlakou. Proud vody nevyplňuje plně průtočné kanály oběžného kola, které musí mít okolí zaplněno vzdušinou. Je-li tlak vzdušiny rovný tlaku atmosférickému, pak nemohou mít tyto turbíny umístěno oběžné kolo pod spodní hladinou vody, neboť voda vnikající do částečně zaplněných průtočných kanálů by narušovala charakter proudění a zhoršovala účinnost. Rovnotlaké turbíny se tradičně označují jako turbíny akční. Není to označení zcela přesné, neboť výsledný účinek proudu vody na lopatky rovnotlakých turbín je dán součtem akčního účinku přímého působení a reakčního účinku plynoucího z ohybu proudu podle geometrie lopatky.

Určitý přechod mezi přetlakovými a rovnotlakými turbínami tvoří dříve užívané turbíny mezní. Jde v podstatě o rovnotlakou turbínu, u níž jsou kanály oběžného kola vytvořeny buď tvarovanými lopatkami podle Obr. 6d, nebo disky tak, že průtočný průřez kanálu je po celé délce zaplněn vodou a v žádném místě nedochází k odtrhávání proudu. Oběžné kolo mezní turbíny je možno umístit pod hladinu vody [6].



Obr. 6 – Členění turbín podle způsobu přenosu energie [6]

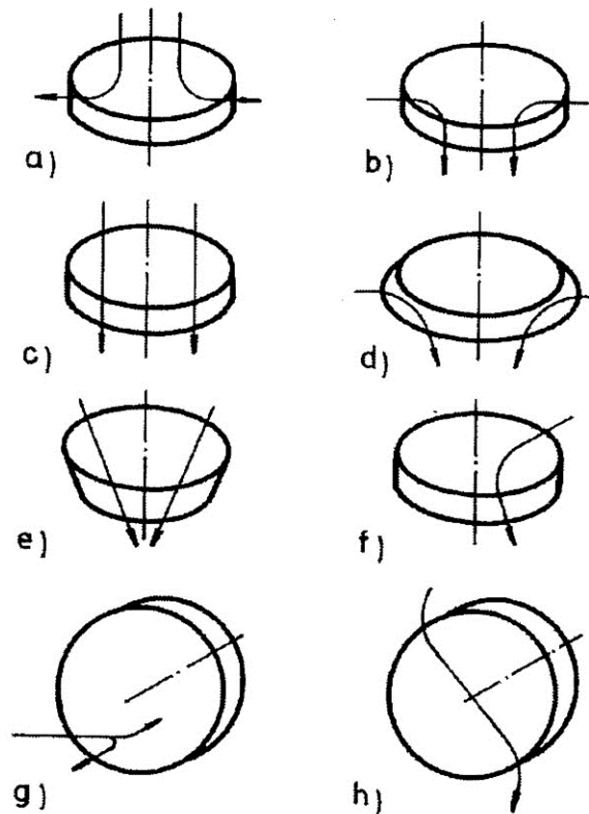
a - přetlaková turbína, b - rovnotlaká turbína, c - rovnotlaká turbína se zavzdušňovacími otvory, d - mezní turbína s tvarovanými lopatkami, 1 - rozvaděč, 2 - oběžné kolo, 3 - dýza, 4 - zavzdušňovací otvor

4.2 Rozdělení turbín podle průtoku vody oběžným kolem

Podle projekčního a konstrukčního řešení se rozlišuje horizontální, vertikální nebo šikmé uspořádání soustrojí vodní turbíny a generátoru. Varianty řešení jsou znásobeny možnostmi uspořádání zařízení pro přívod vody k oběžnému kolu (spirální skříň, kašna, kotel, násosková spirála, spirální komora, uspořádání rozvaděče a jeho regulátoru apod.) a zařízení pro odvod vody od oběžného kola (turbínová skříň, komora oběžného kola, nástavec savky, savka přímá, savka kolenová horizontální nebo vertikální, savka násosková apod.). Určujícím prvkem, nezávislým na variantě řešení, je oběžné kolo se svou typickou orientací proudění.

Rozdělení vodních turbín podle orientace proudění vody vzhledem k ose oběžného kola je uvedeno na Obr. 7, v němž značí:

- a) centrifugální turbína – s vnitřním vtokem vody, přičemž voda protéká oběžným kolem směrem od hřídele, např. turbína Fourneyronova,
- b) centripetální turbína – s vnějším vtokem vody, přičemž voda protéká oběžným kolem směrem k hřídeli, např. historická turbína Francisova,
- c) axiální turbína – voda protéká oběžným kolem ve stálé vzdálenosti od osy oběžného kola, např. Jonvalova turbína, Kaplanova turbína,
- d) radiálně axiální turbína – voda proudí oběžným kolem nejprve radiálně a po přiblížení k ose se mění směr proudění na přibližně osový, např. moderní Francisova turbína,
- e) diagonální turbína – voda protéká oběžným kolem v šikmém směru k ose hřídele, např. Dériazova turbína,
- f) turbína se šikmým průtokem – voda vstupuje na lopatky oběžného kola z boční strany a vystupuje v osovém směru, např. turbína TURGO,
- g) tangenciální turbína – voda vstupuje na lopatky oběžného kola v tangenciálním směru, např. Peltonova turbína,
- h) turbína s dvojnásobným průtokem – voda vstupuje do oběžného kola centripetálně a vystupuje centrifugálně, např. Bánkiho turbína [6].



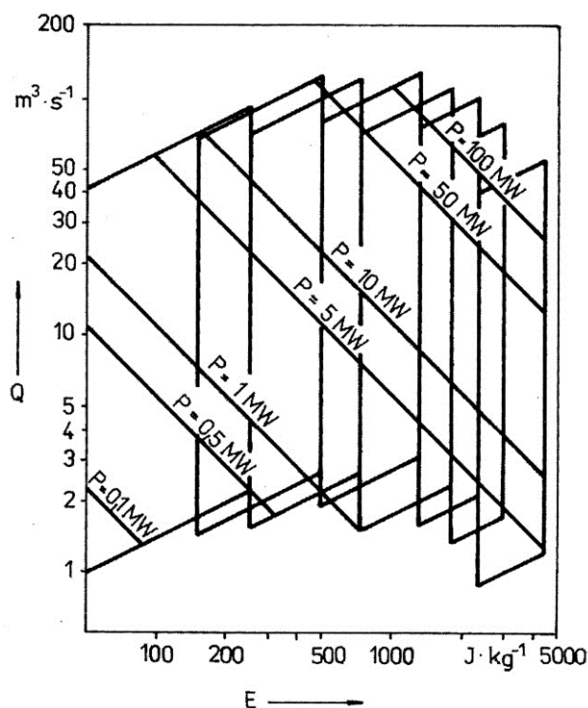
Obr. 7 – Rozdělení turbín podle průtoku oběžným kolem [6]

a - turbína centrifugální, b - turbína centripetální, c - turbína axiální, d - turbína radiálně axiální, e - turbína diagonální, f - turbína se šikmým průtokem, g - turbína tangenciální, h - turbína s dvojnásobným průtokem

4.3 Rozdělení turbín podle měrné energie a výkonu

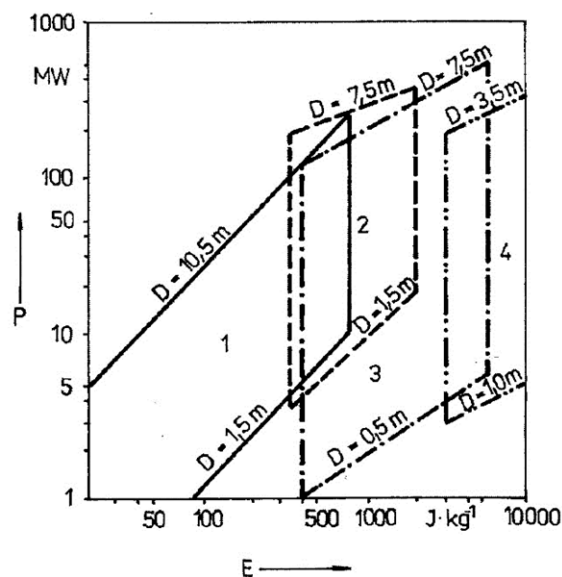
Konkrétní hydraulické řešení turbíny je použitelné pouze v určitém rozmezí hodnot měrné energie a průtoku. Parametry plynoucí z podmínek instalace stroje (průtok, měrná energie) určují pro dané hydraulické řešení nejen výkon, ale i charakteristický rozměr stroje a provozní otáčky.

Provozní rozsah parametrů využitelných určitým typem vodní turbíny je graficky dán obrazcem, který v logaritmických souřadnicích tvoří kosodélník. Při mezních hodnotách měrné energie je vymezen minimálním a maximálním charakteristickým rozměrem, určujícím rozmezí využitelných průtoků. Složením provozních rozsahů jednotlivých typů vodních turbín je dán oblastní diagram použití vodních turbín určitého řešení. Příklad takového detailního řešení oblastního diagramu Francisových turbín pro měrné energie $E = (40 \text{ až } 4\,000) \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ a rozmezí průměrů $D = (0,6 \text{ až } 4) \text{ m}$ je uveden na Obr. 8. Jednotlivé kosodélníky odpovídají určitému typovému hydraulickému řešení [6].



Obr. 8 - Příklad oblastního diagramu Francisových turbín [6]

Rámcový oblastní diagram Kaplanových, Dériazových, Francisových a Peltonových turbín, který vychází z mezních parametrů v současné době uvažovaných, je uveden na Obr. 5.



Obr. 9 - Rámcový oblastní diagram vodních turbín [6]

1 - Kaplanova, 2 - Dériazova, 3 - Francisova, 4 - Peltonova

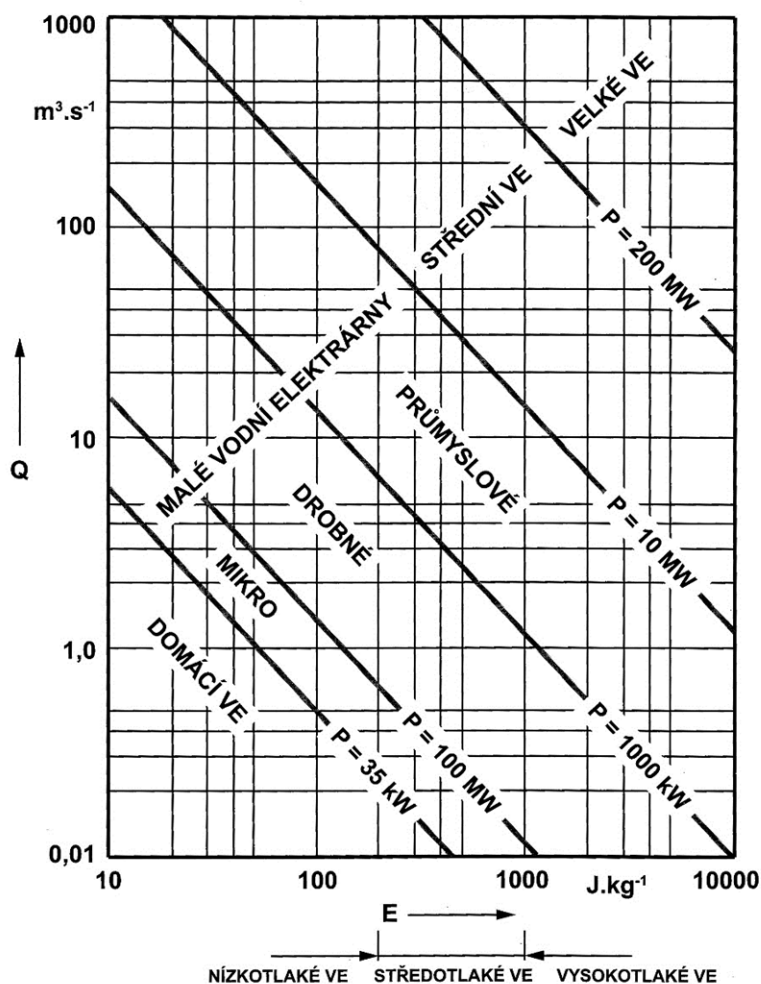
Mezní parametry provozovaných vodních turbín jsou určeny geografickými a hydrologickými podmínkami vodního díla a technologickými možnostmi výroby. V Tab. 5 jsou uvedeny vybrané turbíny, které jsou špičkovými výrobky z hlediska využívané měrné energie, výkonu a určujícího charakteristického rozměru [7].

Tab. 5 - Současné mezní parametry vodních turbín [7]

Turbína	Měrná energie E (J.kg^{-1})	Výkon P (MW)	Průměr oběžného kola D (m)	Vodní elektrárna
Kaplanova	705	94,1	4,6	ORLÍK (Česká republika)
	270	170	11,3	GEZHOUBA (Čína)
	272	178	9,5	ŽELEZNÁ VRATA (Rumunsko – Srbsko)
Francisova	7340	180	2,7	HAUSLING (Rakousko)
	1184	700	8,5	ITAIPU (Brazílie – Paraguay)
	791	700	9,8	SAN – SIA (Čína)
Peltonova	4130	167	5,44	NEW COLGATE (USA)
	17660	22,8	2,15	REISSECK (Rakousko)
	11350	315	5,1	EIDFJORD (Norsko)

Jak již bylo uvedeno, podle hodnoty měrné energie využívané ve vodní turbíně, se rozlišují turbíny:

- nízkotlaké ($E < 200 \text{ J.kg}^{-1}$)
- středotlaké ($E < 1000 \text{ J.kg}^{-1}$)
- vysokotlaké ($E > 1000 \text{ J.kg}^{-1}$) – viz Obr. 10.


Obr. 10 - Rozdělení vodních elektráren podle výkonu [6]

Jak vyplývá z rámcového oblastního diagramu na Obr. 9, jsou nízkotlakými stroji turbíny Kaplanovy, středotlakými turbíny Kaplanovy, Dériazovy a Francisovy a vysokotlakými turbíny Francisovy a Peltonovy.

Oproti členění vodních elektráren je rozdělení turbín dle výkonu na malé, střední a velké stroje dosti problematické a není dosud sjednoceno. Uvážíme-li předpoklad instalace čtyř strojů v klasicky řešené vodní elektrárně, potom lze uvažovat výkon $P = 25$ MW jako rozmezí mezi střední a velkou vodní turbínou z výkonového hlediska. Z hlediska celkového řešení se zpravidla považuje za střední turbínu stroj jmenovitého průměru oběžného kola $D = 2,5$ m u vodních elektráren nízkotlakových a stroj jmenovitého průměru oběžného kola $D = 1,6$ m u ostatních elektráren středotlakých. Vyjdeme-li z ustáleného výkonového vymezení pojmu malé vodní elektrárny a uvažujeme-li předpoklad instalace minimálního počtu dvou strojů, potom jsou turbíny pro malé vodní elektrárny z hlediska výkonového omezeny výkonem $P = 5$ MW [6].

4.4 Nejpoužívanější vodní turbíny

Rovnotlaké turbíny

Peltonova turbína

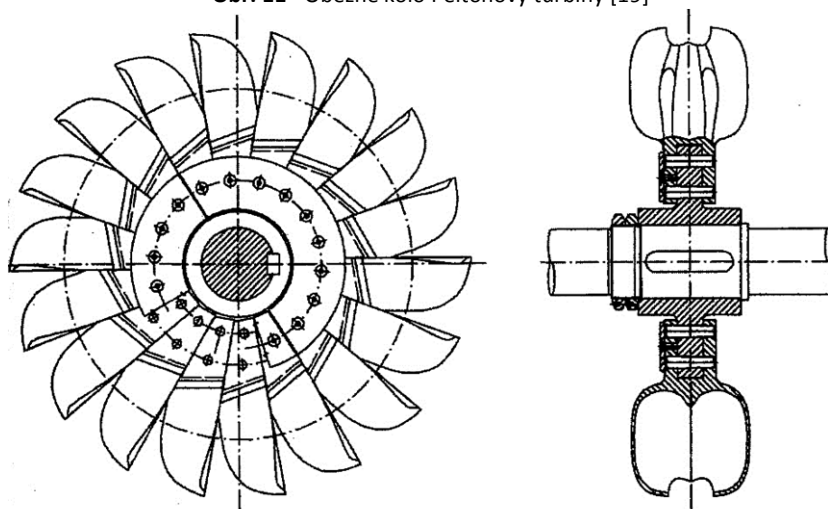
Nejčastěji používaným typem rovnotlaké turbíny, uplatňujícím se i při realizaci malých vodních elektráren, je Peltonova turbína. Její předností je relativní jednoduchost hydraulického a konstrukčního řešení a použitelnost pro okrajové hodnoty průtoku i měrné energie. Pro průmyslové malé vodní elektrárny se uvažuje využití oblastí měrných energií $E = (500 \text{ až } 4\,000) \text{ J.kg}^{-1}$ a průtoků $Q = (0,2 \text{ až } 3) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pro drobné malé vodní elektrárny je charakteristické použití Peltonovy turbíny pro měrné energie $E > 200 \text{ J.kg}^{-1}$ a průtoky $Q = (0,01 \text{ až } 0,2) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Rozváděcí ústrojí tvoří dýza, z níž ve tvaru volného paprsku kruhového průřezu vystupuje voda ostříkující (odtud se používá i termínu „stříky“) na roztečném průměru lopatky oběžného kola – viz Obr. 1b. V dýze se přeměňuje celková měrná energie na měrnou energii kinetickou, charakterizovanou střední výtokovou rychlostí paprsku $c_0 = (1,343 \text{ až } 1,372) \cdot E^{1/2}$. Rozmezí číselné konstanty v tomto vztahu je ovlivňováno účinností dýzy, která dosahuje $\eta_d = (0,95 \text{ až } 0,98)$.

Oběžné kolo – viz Obr. 11, se skládá z náboje a po obvodu rozmístěných oběžných lopatek ve tvaru dvojice korečků, symetricky položených vzhledem k rovině kolmé na osu otáčení oběžného kola (rovině břitu). Technologicky se vyrábí oběžné kolo vcelku opracováním odlitku případně výkovku, případně skládané z jednotlivých dvojkorečků, viz Obr. 12, případně segmentů dvojkorečků, uložených na náboji oběžného kola. V rovině symetrie oběžného kola leží rovněž osa dýzy. Určujícím průměrem oběžného kola je roztečný průměr, jehož tečnou je osa dýzy [6].



Obr. 11 - Oběžné kolo Peltonovy turbíny [19]



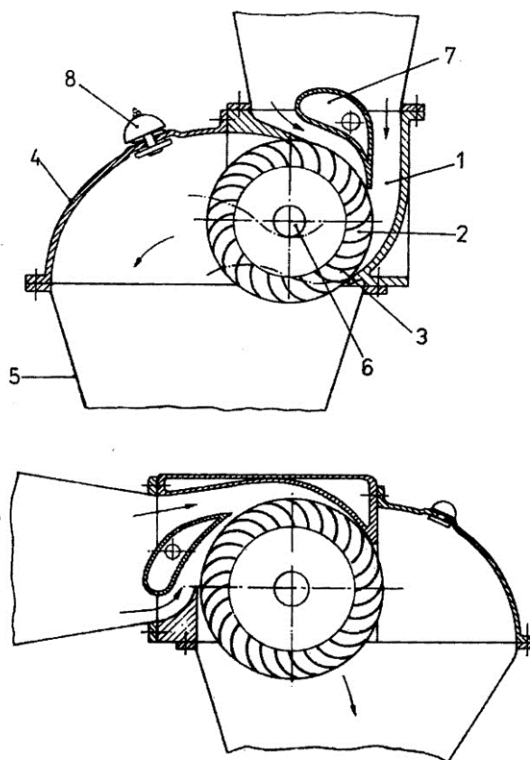
Obr. 12 - Skládané oběžné kolo Peltonovy turbíny [6]

Bánkiho turbína

Specifickým typem rovnotlaké turbíny je radiální turbína s dvojnásobným průtokem, označovaná jako turbína Bánkiho. Autorem řešení z r. 1903 je australský inženýr A. G. M. Mitchel, který využil teorii Ponceletova vodního kola a staršího řešení parních turbín. Prof. D. Bánki prováděl v letech 1912 až 1919 intenzivní experimentální práce s tímto typem turbíny, přidal vstupní těleso a vypracoval teorii jejího řešení. Moderní vývoj Bánkiho turbíny je spojen s firmou Ossberger.

Používá se pro měrné energie $E = (10 \text{ až } 2\,000) \text{ J.kg}^{-1}$ a hodnoty průtoku $Q = (0,02 \text{ až } 9) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Výkonové rozmezí $P = (1 \text{ až } 1\,000) \text{ kW}$ z ní vytváří turbínu vhodnou pro celou oblast řešení malých vodních elektráren. Principiální schéma uspořádání je zřejmé z Obr. 13, na němž jsou zobrazeny dvě varianty řešení přívodu vody k turbíně. Voda je vstupním tělesem 1 přiváděná k části vnějšího obvodu oběžného kola 2, jehož lopatkovou mříží 3 protéká do prostoru uvnitř oběžného kola, odtud přes lopatkovou mříž do tělesa turbíny 4, spojeného s odpadní šachtou nebo se savkou 5. Oběžné kolo je

uloženo na horizontálním hřídeli 6, i když i vertikální provedení je teoreticky možné. Těleso turbíny je opatřeno zavzdušňovacím ventilem 8 [6].



Obr. 13 - Principiální schémata řešení Bánkiho turbíny [6]

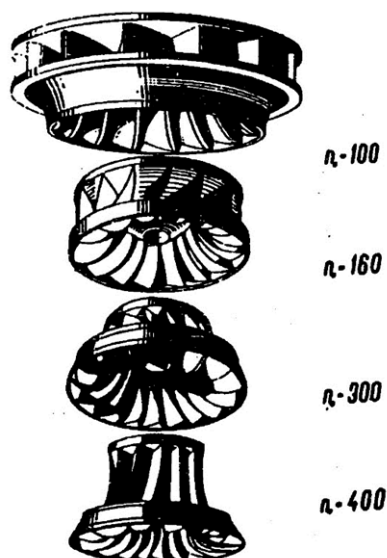
1 - vstupní těleso, 2 - oběžné kolo, 3 - lopatka oběžného kola, 4 - těleso turbíny, 5 - savka, 6 - hřídel, 7 - regulační lopatka, 8 - zavzdušňovací ventil

Z uvedeného popisu vyplývá, že voda protéká oběžným kolem, tvořeným kruhovými deskami, mezi něž jsou po obvodu upevněny oběžné lopatky, dvakrát. První průtok je dostředivý a druhý průtok odstředivý. Přestože řadíme tuto turbínu mezi rovnotlaké, je rovnotlakým pouze druhý průtok oběžným kolem. První průtok lze považovat za přetlakový, neboť následkem minimální vzdálenosti výstupní hrany vstupního tělesa od vstupní hrany lopatek oběžného kola má voda na vstupu do oběžného kola určitou malou hodnotu měrné tlakové energie, která je při prvním průtoku využita. V literatuře je někdy tato turbína řazena mezi mezní turbíny. Pro teoretické řešení se však předpokládá, že i první průtok je rovnotlaký [7],[6].

Přetlakové turbíny

Francisova turbína

Francisovy turbíny jsou určeny pro spády zhruba do 500 m. Spodní hranice využití Francisových turbín se pohybuje okolo hodnoty 100 m. Spády pod touto hranicí pak již spíše využívají jiné druhy turbín (Kaplanovy turbína, vrtulová turbína). Tvar oběžných kol Francisovy turbíny je zřejmý z Obr. 14 [6].



Obr. 14 - Tvary oběžných kol Francisových turbín [6]

n - specifické otáčky, $n = 60 - 120$ – volnoběžná, $n = 120 - 220$ – normální, $n = 220 - 350$ – rychloběžná, $n = 350 - 450$ – expresní Francisova turbína

Uspořádání Francisovy turbíny je možné s horizontální nebo vertikální hřídelí. Přívod vody na oběžné kolo může být pomocí spirály, u menších spádů i odkrytou kašnou.

Voda je na oběžné kolo Francisovy turbíny přiváděna rozvádějícím kolem radiálním směrem, přičemž v oběžném kole se tento směr mění na axiální. Rozváděcí kolo se obvykle konstruuje z lopatek, které jsou otočné kolem čepů, a reguluje se jimi průtok turbínou. Vlastní oběžné kolo turbíny se skládá z vnějšího věnce a náboje, který přechází v kotouč. Lopatky oběžného kola se navrhují z ocelového plechu a jsou zapuštěné do náboje a věnce turbíny, v poslední době se však stále častěji odlévá. Oběžné kolo je nainstalováno na hřídeli turbíny.

Vrtulová a Kaplanova turbína

Vrtulové (Propellerovy) a Kaplanovy turbíny se používají od nejnižších spádů až do hranice zhruba 100 m.

Vrtulové turbíny se vyznačují převládajícím axiálním prouděním vody v oběžném kole. Návrh vrtulových turbín zvýšil specifickou rychloběžnost turbíny. Velkou nevýhodou tohoto typu byl velice strmý průběh účinnosti s ostrým maximem. Vrtulové turbíny pracují s dobrou účinností pouze v malém okolí nejvýhodnějšího pracovního bodu turbíny. To určuje také možnosti jejich použití. Jsou vhodné do lokalit s ustálenými spádovými a průtokovými poměry. Takových lokalit je velice málo, a proto byla vrtulová turbína zdokonalena prof. Kaplanem na turbínu s natáčivými lopatkami oběžného kola.

Kaplanova turbína má možnost regulace jak lopatkami rozváděcími, tak i lopatkami oběžného kola (Obr. 15, Obr. 16). Obě regulace musí být vzájemně svázány regulační vazbou.

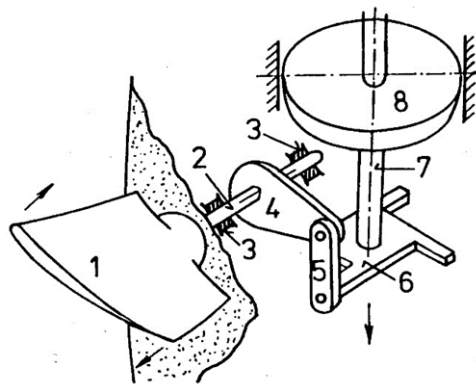
Oběžná kola Kaplanových a vrtulových turbín mají relativně malý počet lopatek, který je přímo úměrný spádu (min. 3 při spádech do 5 m a max. 10 při spádech nad 60 m).

U vrtulových turbín se používá přestavování lopatek za klidu. Lze přitom využít stejného principu jako u pohybování lopatek Kaplanovy turbíny. Místo hydromotoru se však používá stavěcí šroub,

který se dotahuje obvykle z vrcholu náboje oběžného kola. Toto zařízení umožňuje nastavit vrtulovou turbínu na podmínky lokality vodní elektrárny a tak zlepšit její parametry.

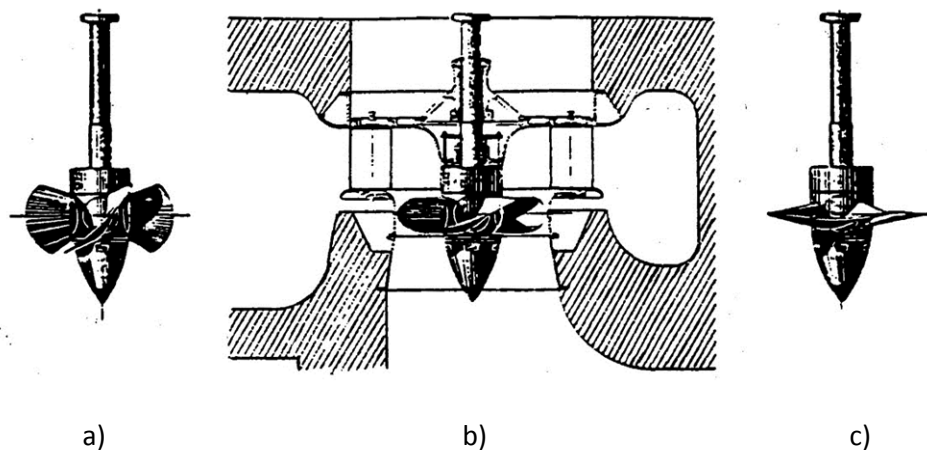
Častým vybavením vrtulových a Kaplanových turbín je zavzdušňovací ventil, který slouží k zavzdušnění prostoru pod oběžným kolem v případě uzavření lopatek rozváděcího kola turbíny. Bez zavzdušňovacího ventilu může dojít při zavření rozvaděče turbíny vlivem setrvačnosti vody k vytvoření tak velkého podtlaku, že dosáhne, až hodnoty tlaku nasycených vodních par. V důsledku toho se může přetrhnout vodní sloupec, který se po vyčerpání energie počne vracet k oběžnému kolu, tak může dojít k nárazu sloupce vody na oběžné kolo a k nadzvednutí celého soustrojí.

Kaplanovy i vrtulové turbíny se používají s horizontální i vertikální osou rotace. U větších soustrojí se navrhuje svislá osa, u menších soustrojí je potom výhodnější vodorovné uložení osy, které klade menší nároky na stavební a základové práce [7],[6]



Obr. 15 - Zařízení pro natáčení lopatek Kaplanovy turbíny [6]

1 - oběžná lopatka, 2 - čep lopatky, 3 - ložiska čepu lopatek, 4 - táhlo, 5 - táhlo stavěcího kříže, 6 - stavěcí kříž, 7 - hřídel hydromotoru

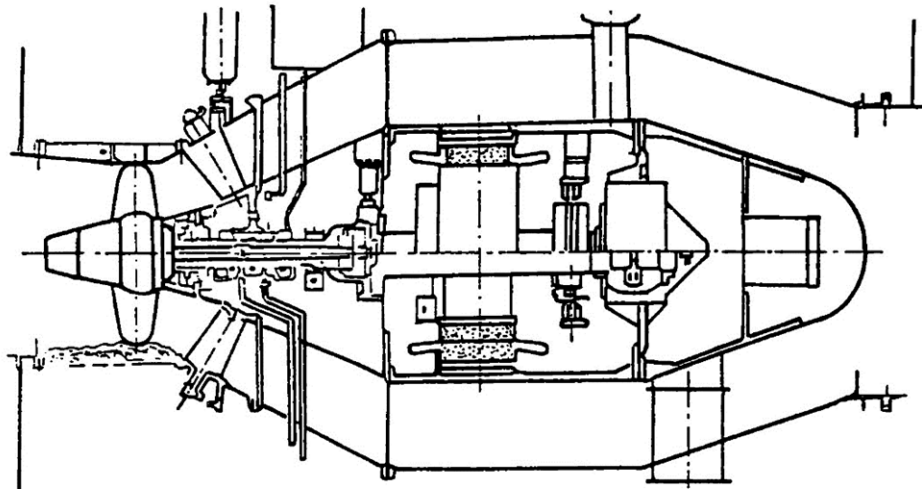


Obr. 16 - Oběžné kolo Kaplanovy turbíny v různých polohách [6]

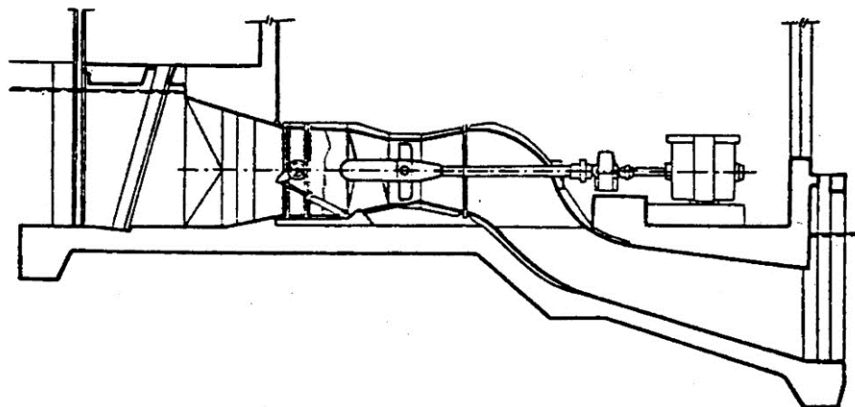
a – otevřená poloha, b – polootevřená poloha, c – zavřená poloha

Přímoproudá turbína

Přímoproudá turbína neodvozuje svůj název od konstrukce oběžného kola, ale od dispozičního uspořádání přívodu vody na turbínu. Toto uspořádání umožňuje přímý nátok vody na turbínu – odtud název přímoproudá turbína (Obr. 17, Obr. 18) [6].



Obr. 17 - Přímoproudá turbína s obtékaným generátorem [6]



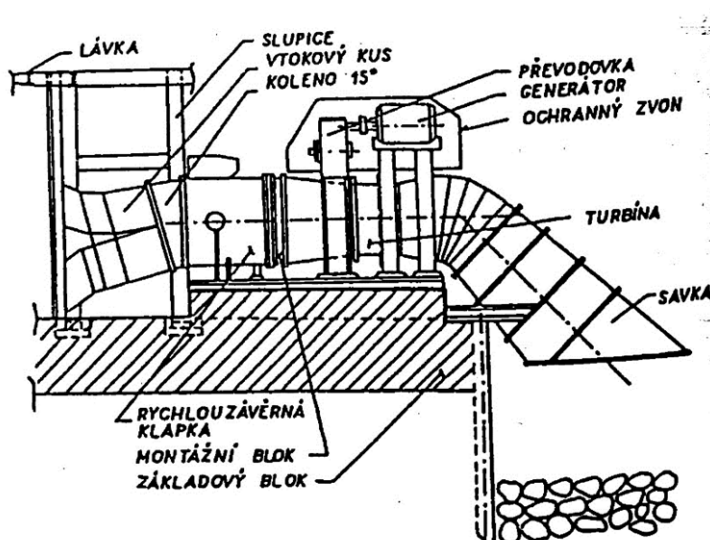
Obr. 18 - Přímoproudá turbína s vnějším generátorem [6]

U přímoproudých turbín se nejčastěji používá Kaplanova běžného kola, méně vhodná je vrtulová turbína, obvykle s lopatkami oběžného kola představitelnými za klidu. Díky horizontálnímu spořádání lze využít i poměrně malých spádů a použít i mělkého založení vodní elektrárny. Turbína nemá spirálu a savka se používá přímá kónická nebo esovitě zahnutá.

Základním problémem těchto typu turbín je vyvedení mechanické energie z turbíny ven. Zatím jsou známy dva základní způsoby. U prvního je generátor umístěn v přívaděči vody na turbínu jako obtékaný generátor a ven je odváděna již elektrická energie, nejčastěji podpěrnými sloupy generátoru (Obr. 17). Druhé řešení vyvádí mechanickou energii. V současné době se nejčastěji používají dva způsoby:

- a) hřídel turbíny prochází kolenem turbíny ven a je k němu napojen generátor (Obr. 18). Této turbíně se říká kolenová turbína a jde vlastně o typ přímoproudé turbíny.

- b) mechanická energie je přenášena na generátor řetězovým a ozubeným převodem, který prochází podpěrnými pilířky turbíny (Obr. 19) [6].

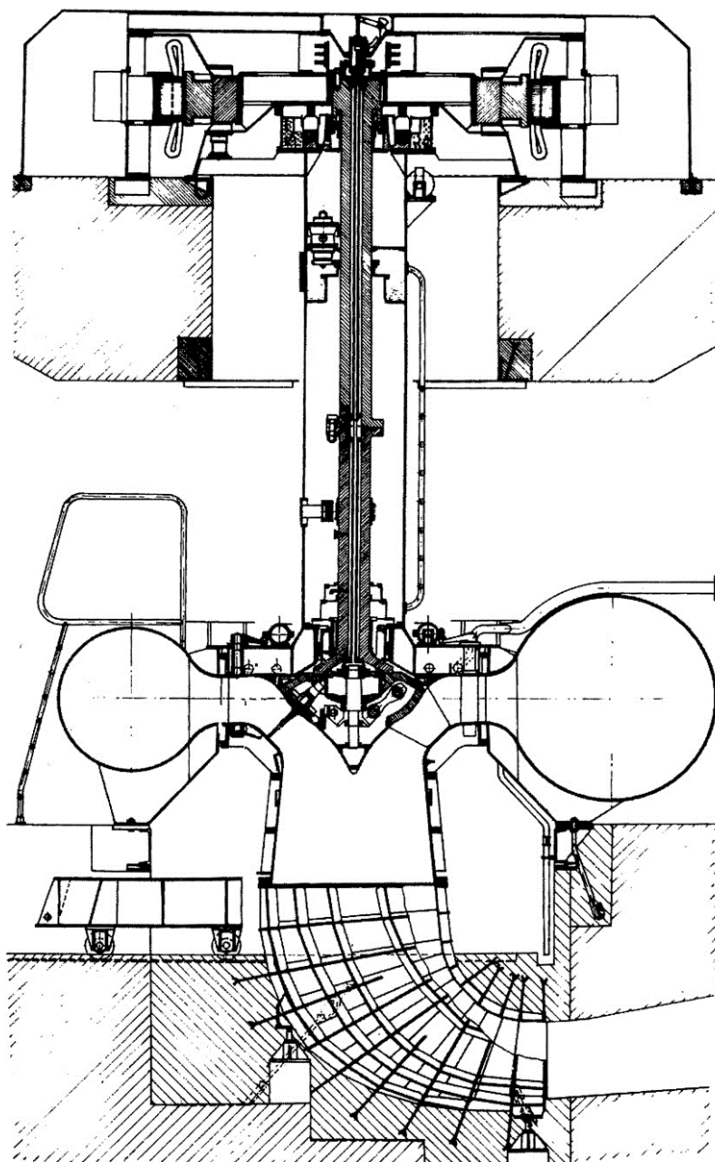


Obr. 19 - Přímoproudá turbína s vnějším generátorem, řetězovým a ozubeným převodem [6]

Dériazova turbína

Z hlediska komplexnosti pohledu na sledovanou problematiku je nutno připustit, že ve speciálním případě řešení malé vodní elektrárny se může použít i Dériazovy turbíny. Jak však ukazuje Obr. 20, jde o turbínu s relativně složitým mechanismem ovládání oběžného kola, který je i přes výraznou analogii s řešením používaným u Kaplanovy turbíny, technologicky náročnější a obsahuje kulové klouby. Uvedený příklad řešení sice patří do kategorie turbín pro malé vodní elektrárny, avšak určení výkonu turbíny v tomto případě bylo sekundární podmínkou řešení. Přitom přístup k řešení nese typické znaky aplikace klasického konstrukčního zpracování, analogického jako u turbín velkého výkonu.

Pře Dériazovou turbínou se dává přednost při využití v malých vodních elektrárnách Kaplanovým turbínám a jejich variantám i v případě, kdy by z hydraulického hlediska řešení bylo vhodné použít právě Dériazovu turbínu [6].



Obr. 20 - Dériazova turbína pro elektrárnu Mikšová (Slovensko) [6]

5 Vodárenství

5.1 Systémy zásobování vodou

Jedná se o vodárenské systémy skládající se ze zařízení potřebných pro odběr vody, její úpravy a rozvod.

Tvoří je tyto základní prvky:

- zdroj vody,
- úpravna vody,
- čerpací stanice,
- akumulace vody,
- doprava a rozvod vody,
- regulační prvky dopravy vody.

Jejich uspořádání a využití se liší v závislosti na způsobu spotřeby, jeho výškového a plošného rozložení, v závislosti na druhu vodovodního zdroje, na použitých finančních prostředcích a také na místních zvyklostech.

Podle počtu připojených míst spotřeby dělíme systémy zásobování vody na:

- Místní vodovody, na které jsou napojena samostatná místa spotřeby.
- Skupinové vodovody, které sdružují několik obcí, využívajících společně jeden, nebo více vodních zdrojů.
- Dálkovody, které slouží pro dopravu vody na dlouhé vzdálenosti a dodávají vodu místním vodovodům, nebo skupinovým vodovodům. Dálkovody nemají přímá místa spotřeby vody.
- Oblastní vodovody, které zahrnují větší územní celky. Oblastní vodovody řeší zásobování vodou místa spotřeby, která nemají v místě spotřeby přijatelný zdroj vody, takový který by byl dostatečně vydatný a kvalitní. Rozdíl mezi oblastním a skupinovým vodovodem spočívá v tom, že oblastní vodovod zásobuje zpravidla velký počet spotřebitelů na území přesahujícím obvykle i rozsah okresu.

Základní systémy zásobování vodou dělené podle výškového uspořádání:

- gravitační systémy,
- výtlačné systémy [9].

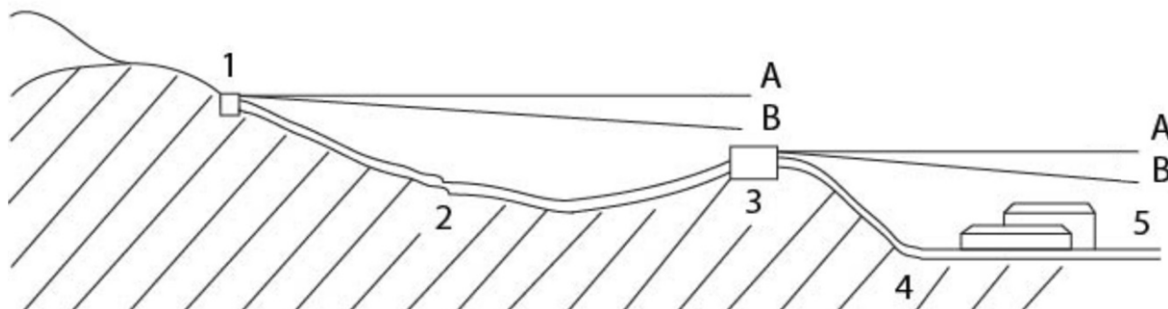
Gravitační systémy zásobování vodou

Gravitační systémy zásobování vodou dopravují vodu do místa spotřeby samospádem, gravitační silou. Prvky systému vytvářející tlak jsou nad místy spotřeby vody, voda může proudit v dvou režimech:

- tlakovo-gravitačním režimem,
- beztlakovo-gravitačním režimem, proudění s volnou hladinou.

Tlakový systém znamená, že voda zaplní celý průřez potrubí a vytváří tlak v potrubí. Tlakové proudění se navrhuje v každém místě spotřeby, protože jen takové proudění zabezpečí potřebný tlak

v přípojkách spotřebitelů. Beztakové proudění s volnou hladinou, např. ve žlabech je možné navrhnout jen v úsecích od zdroje k úpravě vody, případně k vodojemu. Příklad gravitačního systému zásobování vodou je na Obr. 21.



Obr. 21 - Gravitační systém zásobování vodou [9]

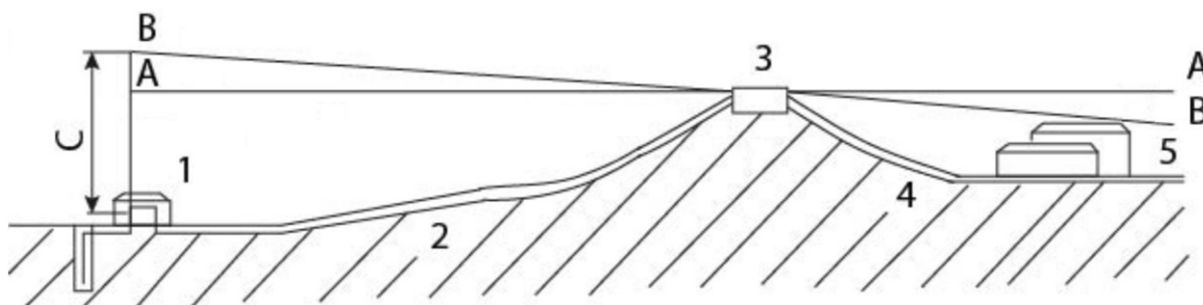
A – čára statického tlaku, B – čára dynamického tlaku, 1 – zdroj vody, 2 – příváděcí řad, 3 – vodojem, 4 – zásobovací řad, 5 – místo spotřeby vody

Tlak v potrubí gravitačních systémů určuje zpravidla vodojem, jehož umístění vzhledem k místu spotřeby může být různé, dle požadovaných tlakových poměrů ve vodovodním řadu [9].

Výtlačné systémy zásobování vodou

Výtlačné systémy zásobování vodou se používají v případech, kdy výšková poloha místa spotřeby neumožňuje jeho gravitační zásobování. Voda je nejčastěji čerpána ze zdroje do vodojemu, nebo také z vodojemu automatickou tlakovou stanicí do místa spotřeby vody, případně je potřeba čerpat vodu přímo do místa spotřeby.

V praxi je nejčastější řešení různých kombinací systémů gravitačních a výtlačných, tento případ je zobrazen na Obr. 22.



Obr. 22 - Kombinace gravitačního a výtlačného systému zásobování vodou [9]

A – čára statického tlaku, B – čára dynamického tlaku, C – výtlačná výška, 1 – zdroj vody, 2 – příváděcí řad, 3 – vodojem, 4 – zásobovací řad, 5 – místo spotřeby vody

Příkladem je čerpání vody ze studně do vodojemu a gravitační zásobování vodou místa spotřeby z vodojemu, lze se setkat i s obrácenou kombinací: gravitační přítok ze zdroje vody do vodojemu,

z vodojemu čerpání vody do místa spotřeby [9].

5.2 Tlakové poměry při dopravě vody – tlaková pásma

V systémech zásobování vodou se mimo jiné využívá tlakový systém dopravy vody v potrubí.

Tlak v potrubí je důležitý z mnoha důvodů:

- zabezpečení dostatečného tlaku ve vodovodních přípojkách pro potřeby spotřebitele,
- doprava vody ze zdrojů a objektů vodovodů do míst spotřeby,
- zabezpečení dostatečného tlaku pro požární účely, pokud vodovod slouží i pro požární účely [9].

Tlaková pásma v zásobovacích a rozvodných řadech

Tlak ve vodovodních přípojkách v místě spotřeby vody musí odpovídat technickým požadavkům ve smyslu platných předpisů. V přípojce v místě připojení na veřejný vodovod musí tlaky v potrubí splňovat tyto podmínky:

- maximální tlak 0,6 MPa (v odůvodněných případech 0,7 MPa)
- minimální tlak 0,25 MPa (případně 0,15 MPa, nebo 0,1 MPa).

Podmínka maximálního tlaku 0,6 MPa tj. 60 m v rozvodné síti je dána maximální hodnotou tlaku pro armatury v přípojkách a v domácích rozvodech. Platí pro potrubí, na kterém jsou přípojky. Pro přiváděcí, nebo zásobovací potrubí, na kterých nejsou připojeni spotřebitelé, může tlak dosáhnout hodnotu, kterou předepisuje výrobce použitého potrubí. Potrubí a spoje na potrubí se vyrábějí v různých tlakových řadách a mohou snést tlak i přes 200 m vodního sloupce. Maximální tlak v rozvodném potrubí vodovodního řadu vzniká v čase nejmenších odběrů (v nočních hodinách), kdy se tlaková hydrodynamická čára blíží k čáře hydrostatického tlaku. Při výpočtech tlaku ve vodovodním řadu se neuvažuje s ojedinělými výškovými budovami. V těchto objektech se zpravidla zřizují posilovací stanice, které nejsou součástí veřejného vodovodu.

Podmínka minimálního tlaku 0,25 MPa tj. 25 m je dána požárními požadavky v případě, pokud vodovod zabezpečuje také požární potřeby. Pokud vodovod nezabezpečuje požární potřebu, může být tlak na přípojce snížen na 0,15 MPa v případě dvojpodlažní zástavby, nebo 0,1 MPa pokud je přípojka situována pod zásobním vodojemem, nebo pokud je přípojka v odlehlých místech pro budovy maximálně do dvoupodlažní zástavby. Minimální tlak v rozvodné síti vzniká v době maximálních odběrů. V obytných zónách se jedná o večerní hodiny, kdy vznikají nejvyšší tlakové ztráty, tyto ztráty jsou umocněny třením při proudění vody.

Pokud se místo spotřeby nachází ve výškově členitém terénu, je možné splnit maximální a minimální tlakové požadavky jen při rozdělení vodovodního systému na samostatná tlaková pásma.

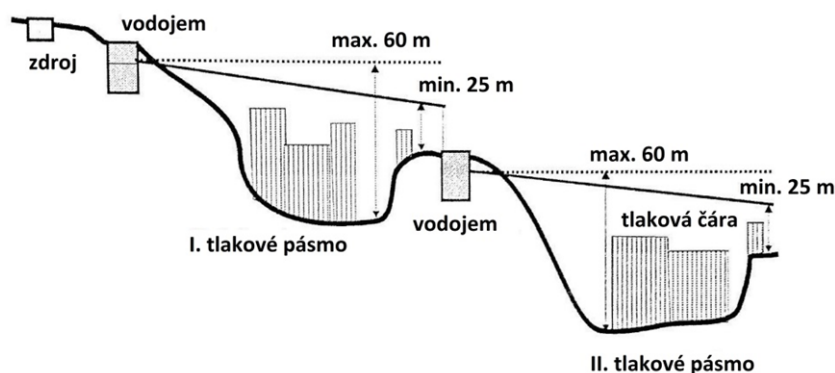
Tlaková pásma jsou hydraulicky samostatné celky, které na zabezpečení své funkce musí mít i příslušné objekty (např. vodojem, čerpací stanice apod.). Proto je důležité při návrhu tlakových pásem z investičního i provozního hlediska minimalizovat počet těchto tlakových pásem.

Jsou různé možnosti dělení systému na tlaková pásma, související s terénními i technickými možnostmi, také s rozdělením spotřebišť. Nedá se uvést přesný vzorec na přesný výpočet tlakových pásem, protože každý systém má jiné předpoklady a vstupní parametry.

Na rozdělení vodovodní sítě na tlaková pásma se využívají tyto prvky:

- vodojemy,
- přerušovací komory,
- redukční ventily,
- čerpací stanice,
- automatické čerpací stanice (ATS).

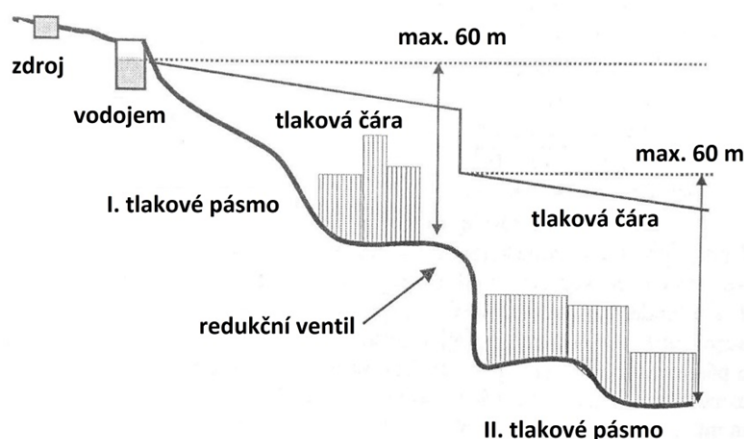
Vodojemy jsou hydraulicky nejlepším řešením dělení sítě na samostatná tlaková pásma. Rozdělení vodovodní sítě na tlaková pásma vodojemy je možné například v případě zástavby v údolí s výškovým převýšením nad 60 m. Příklad takového řešení je na Obr. 23. Horní vodojem zásobuje II. tlakové pásmo, nižší vodojem zásobuje I. tlakové pásmo samostatnými přívody do samostatných tlakových pásem. Vodojemy mohou být umístěny na různých stranách spotřebišť. Výškový rozdíl mezi vodojemy je dán rozdílem maximálního a minimálního tlaku v síti mezi těmito vodojemy, tedy 35 m vodního sloupce.



Obr. 23 – Tlaková pásma tvořená vodojemy [9]

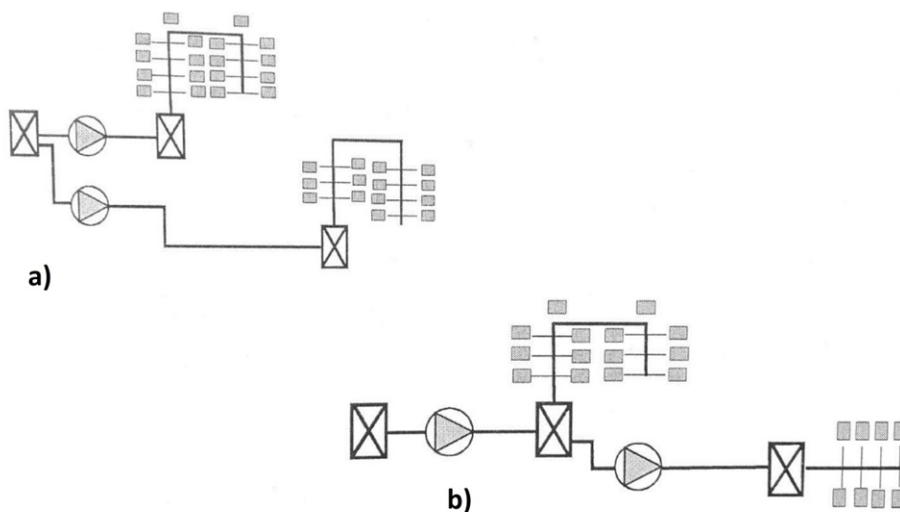
Přerušovací komory jsou objekty s volnou hladinou, v kterých se přeruší tlak. Jsou to jednoduché nádrže a v porovnání s vodojemy mají velmi malý akumulační objem. Používají se hlavně pro přerušování tlaku na přívodních potrubích ze zdroje do vodojemu. V zásobovací a rozvodné síti spotřebišť se používají jen ojediněle.

Redukční ventil se na přerušování tlaku a oddělení tlakových pásem používá hlavně v zastavěném území. Je to armatura osazená na potrubí, reguluje poté výstupní tlak na nastavenou konstantní hodnotu. Z provozního hlediska je spolehlivější přerušování tlaku volnou hladinou, ale toto řešení není možné vždy. Hlavně na vodovodní síti v zastavěném území je jednodušší na přerušování tlaku použít redukční ventil umístěný v podzemní šachtě spolu s měřením vstupního a výstupního tlaku, kontrolovaného přes dispečink. Redukční ventily je možné v ojedinělých případech použít také v přípojkách, pokud není možné v rozvodné síti zabezpečit menší tlak jako 60 m vodního sloupce (např. v koncových bodech níže položených zástaveb). Příklad rozdělení sítě redukčním ventilem je na Obr. 24.



Obr. 24 – Tlaková pásma tvořená redukčním ventilem na potrubí [9]

Čerpací stanice je možné použít na rozdělení tlakových pásem spolu s vodojemy v případech výtlačných vodovodních sítí, kde se voda čerpá do různě výškově položených vodojemů. Příklad tlakových pásem tvořených čerpacími stanicemi je na Obr. 25.



Obr. 25 – Tlaková pásma tvořená čerpacími stanicemi [9]

a – paralelní zapojení čerpacích stanic, b – sériové zapojení čerpacích stanic

Při návrhu počtu tlakových pásem pro výtlačné vodovodní systémy je potřebné věnovat pozornost ekonomickým otázkám provozních nákladů čerpání vody. Náklady na čerpání vody do systému, který není dělený na tlaková pásma, jsou vyšší jako náklady na čerpání vody do vodojemů jednotlivých pásem.

Tlaková pásma tvořená čerpáním vody mohou být tvořena dle výstavby paralelní, nebo sériová. Při sériovém zapojení tlakových pásem se voda čerpá kaskádovitě nejdříve do níže položených vodojemů a odtud se čerpá voda do výše položených vodojemů. Každé tlakové pásmo má samostatný vodojem a čerpací stanici.

Při paralelním zapojení tlakových pásem se voda čerpá z jedné čerpací stanice různými čerpadly (s různou čerpací charakteristikou) samostatnými výtlačky do dvou různě výškově položených

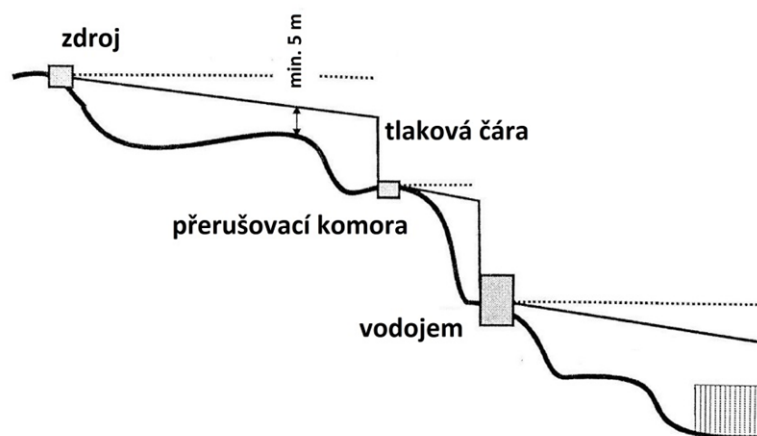
vodojemů. Ve starších systémech se můžeme setkat také s méně ekonomicky výhodným čerpáním společným výtlačem do dvou různě výškově položených vodojemů, v tomto případě musí mít níže položený vodojem škrcený přítok, protože dopravní výška čerpadla je stanovena pro výše položený vodojem.

Automatické tlakové stanice (ATS) se používají na zásobování výše položených částí spotřebišť, přímo výtlačem bez použití vodojemu. ATS může zvyšovat vstupní nepřerušovaný tlak ze sítě a na výstupu do spotřebišť zabezpečuje stálý tlak. ATS se používá také na zvýšení tlaků pro lokality s vyšší zástavbou, čímž se také vytvoří samostatné tlakové pásmo [9].

Tlakové poměry na příváděcích potrubích

Pro tlakové příváděcí řady neplatí hraniční podmínka maximálního tlaku 0,6 MPa a ani minimálního tlaku 0,25 MPa. Hraniční hodnoty tlaku v potrubí závisí na použitém materiálu potrubí a na spojích potrubí. Při návrhu potrubí je třeba počítat i s vyšším tlakem v potrubí, který nastane při tlakových zkouškách. I pokud některé použité materiály vydrží vysoký tlak (2 MPa), z provozního hlediska je vhodné a bezpečnější, tlak přerušit. Toto se týká také gravitačních systémů, stejně jako výtlačných.

Podmínka minimálního tlaku na přívodních potrubích je dána hydraulikou tlakového proudění. Aby voda proudila, musí být nejvyšší bod trasy proudění pod jeho tlakovou čarou. Při velmi malém tlaku však může dojít k zavzdušnění vrcholových míst na potrubí, která jsou nejvýše, v takovém případě se stane potrubí neprůtočným. Proto je důležité v takových místech zabezpečit tlak minimálně 0,05 MPa. Toto platí pro gravitační i výtlačný přivaděč. V takových vrcholových místech potrubí musí být osazený na potrubí vzdušník. Vyznačení této podmínky je na Obr. 26.



Obr. 26 – Gravitační přívodní potrubí s přerušením tlaku v přerušovací komoře [9]

Změnu tlaku na příváděcích potrubích podobně jako na rozvodných a zásobovacích potrubích můžeme navrhnout v následujících objektech:

- přerušovací komory,
- přerušovací vodojemy,
- čerpací stanice.

Přerušovací komory jsou nejčastěji používanými pro přerušení tlaku na přiváděcích řadech ze zdroje vody, které se nacházejí vysoko nad místem spotřeby. Přerušovací komora je nádrž, na odtoku které je tlak stabilizovaný na úrovni hladiny vody v této komoře. Tlak je přerušený na takové výškové kótě, aby nebyl překročený přípustný provozní tlak předepsaný výrobcem použitého potrubního materiálu a jeho spojů. Také je potřebné mít na mysli, že minimální tlak při překonávání terénních nerovností je 0,05 MPa. Příklad řešení přívodního potrubí gravitačním přívodem s tlakovým prouděním ze zdroje přes terénní převýšení je na Obr. 26.

Při výtlačném přívodním potrubí ze zdroje do vodojemu se v případě velkých výškových rozdílů navrhuje kaskádovité čerpání vody ve vícenásobných stupních, jejichž výška je dána povoleným maximálním tlakem určeným výrobcem použitého potrubí. Maximální dovolené přetlaky v potrubí jsou dané hodnotou PN (jmenovitý tlak) a jsou uvedeny výrobcem u každého druhu potrubí [9].

5.3 Armatury vodovodních potrubí

Armatury můžeme z hlediska jejich funkce v systému zásobování vodou rozdělit do skupin:

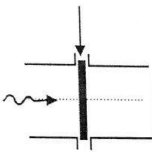
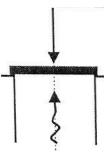
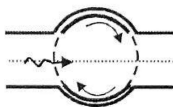
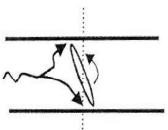
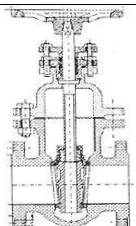
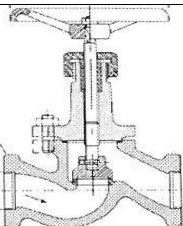
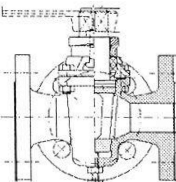
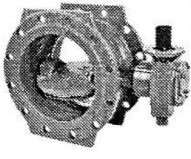
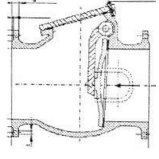
- Armatury, které uzavírají a otevírají přítok potrubím – uzávěry potrubí.
- Regulační armatury, které regulují tlak, průtok a jeho směr.
- Pojistné armatury, slouží k ochraně potrubí před hydraulickými změnami.
- Výpustné armatury, které zabezpečují vypuštění vody z potrubí.
- Montážní a pomocné armatury.
- Měřicí armatury.

Základními typy armatury jsou uzávěrové armatury (slouží k uzavírání, otevírání, regulování a vypouštění), které je možno z konstrukčního hlediska rozdělit na:

- zásuvné uzávěry,
- ventily,
- kohouty,
- klapkové uzávěry

Z hlediska provozního použití je možno tyto uzavírací armatury použít pro více funkcí uvedených výše. Rozdíl mezi nimi je zobrazen v Tab. 6. Způsob ovládání uzavíracích armatur může být různý, podle osazení a funkčnosti armatur. Jedná se o ovládání vřetenem, ručním ovládáním, elektromotorem nebo pneumatickým pohonem [9].

Tab. 6 – Uzavírací a regulační armatury [9]

Pracovní pohyb uzavíracího tělesa	Přímočarý pohyb		Otáčivý pohyb okolo osy příčně k proudění		
Znázornění směrů proudění a uzavírání					
Konstrukce	Zásuvný uzávěr	Ventil	Kohout	Klapkový uzávěr	Zpětná klapka
Znázornění					
Použití	Uzavírání potrubí	Regulace průtoku spojená s uzavíráním potrubí	Regulace průtoku spojená s uzavíráním potrubí (menší profily)	Regulace průtoku spojená s uzavíráním potrubí (větší profily)	Regulace směru průtoku

Regulační armatury

Regulační armatury se ve vodárenských systémech osazují za účelem regulace tlaku, nebo průtoku. K regulačním armaturám patří také klapkový uzávěr, protože se používá i na škrcení průtoku. Všeobecně se však regulačními armaturami označují uzávěry typu ventil. Na rozdíl od zásuvných uzávěrů se uzavírací těleso ventilu pohybuje axiálně ve směru průtoku (Tab. 6). To umožňuje škrcení průtoku a jeho regulaci. Stejnou funkci je možné docílit i kulovými kohouty, ty se však vyrábějí jen na menší profily a našly uplatnění hlavně v domácích rozvodech vody. Moderní ventily na regulaci průtoku jsou vybaveny elektromotorem, který postupně otevírá (uzavírá) sedlo ventilu a kontroluje tak průtok na výstupu, dokud nedosáhne shodu se zadaným průtokem.

K regulačním armaturám ve vodovodních sítích patří také armatury regulující hladinu vody ve vodojemu – automaticky otevírají a uzavírají průtok podle výšky hladiny v nádrži vodojemu. Může to být mechanický plovákový ventil, nebo ventil řízený elektromotorem.

V systému zásobování vodou se využívají hlavně redukční ventily redukující tlak. Redukční ventil tlaku má konstrukci ventilu s pružným uzavíracím tělesem, který tvoří pružina nebo pružná membrána. Redukční ventily na snížení tlaku se navrhují tam, kde je potřebné trvale, nebo dočasně snížit tlak, popř. vytvořit samostatné tlakové pásmo. Existují mechanické, nebo elektronicky řízené redukční ventily. Elektricky nebo pneumaticky řízené redukční ventily dokáží měnit (snižovat) výstupní tlak na přesnou hodnotu dle potřeby. Řízená změna tlaku se využívá při snižování ztrát vody

např. redukcí nočních tlaků vody. Redukční ventily a ostatní regulační armatury se vždy osazují do šachet. Instalace redukčního ventilu musí umožňovat nepřetržitou dodávku vody i při demontáži redukční armatury. Před redukčním ventilem musí být osazený filtr, před a za redukčním ventilem musí být osazeno i měření tlaku [9].

6 Problematika ekologie, výstavby a provozu MVE

6.1 MVE a životní prostředí

Každý energetický zdroj vytváří vazby se životním prostředím. Tyto vazby bývají různé při výstavbě zdroje, při jeho provozování po celou dobu životnosti a konečně i při likvidaci zdroje po jeho technickém nebo morálním dožití. Základní pozitivní ekologickou vazbou každého energetického zdroje - bez ohledu na jeho typ a charakter - je vytvářet užitek v podobě vyráběné elektrické energie, bez níž se již dnes neobejde žádná vyspělá společnost. Tato základní pozitivní ekologická vazba však bývá u většiny energetických zdrojů vykoupena i některými vazbami z ekologického hlediska negativními. Tyto negativní ekologické dopady energetických zdrojů jsou v posledních letech intenzivně zkoumány s cílem naučit se je bez podceňování předvídat a hlavně umět je potlačit na co nejmenší možnou míru již ve stadiu projektování a přípravy energetických děl.

Přestože hydroenergetické zdroje jsou všeobecně uznávány jako zdroje ekologicky čisté již svým základním principem energetických přeměn, je i zde třeba se ekologickými otázkami zabývat a odhalovat možnosti plného využití všech vazeb ekologicky pozitivních a potlačit všechny faktory, které by mohly vést k vytvoření vazeb ekologicky negativních.

Odběrem části mechanické energie vody z toku pro hydroenergetické účely se trvale mění energetická bilance toku v tom smyslu, že se v průměru zmenšuje množství energie, kterou má tok k dispozici pro korytotvorné procesy (vymílání břehů a dna a transport materiálu po toku). V tom směru má hydroenergetické využívání toků ekologicky pozitivní dopad. Dokladem toho byl naopak ekologicky negativní dopad náhlého rušení MVE v minulosti, čímž se vždy více nebo méně porušila energetická rovnováha toků, uvolnilo se větší množství mechanické energie pro korytotvorné procesy a toky začaly divočet. To se zpravidla neobešlo bez vícenásledků na nové úpravy toků.

Provozování MVE na tocích bylo a je rovněž obecně příznivé pro snahu o větší a komplexnější péči o údržbu toků a vzdouvacích staveb. U klasických MVE lze k jednoznačně příznivým dopadům přičíst i mechanické čištění vody na česlích, pokud je však vytažené splaví řádně likvidováno.

Ekologicky nejvýraznější pozitivní dopad má vlastní výroba elektrické energie, kterou tyto MVE poskytují, a vytěsňují tak příslušnou výrobu v tepelných elektrárnách (především zastaralých typů s velkou měrnou spotřebou paliva a s velkou produkcí exhalací). Jde jak o úsporu paliva a chladicí vody, tak o výrazné snížení negativních ekologických dopadů, spojených s těžbou, dopravou a exhalacemi při spalování fosilních paliv.

Navíc lze u MVE prostory objektu strojovny využít pro osazení čidel, měřidel a zařízení ke sledování teploty a čistoty vody a k průběžnému měření průtoků pro účely dálkového řízení jednotlivých děl i celých kaskád. U MVE lze využívat i ztrátové teplo pro zlepšení klimatizace jinak velmi vlhkých prostorů, kde by bylo jinak obtížné trvale provozovat jmenovaná zařízení.

Ekologické vazby mezi MVE a životním a přírodním prostředím se vytvářejí různě v průběhu výstavby, v průběhu provozování a při obnově a rekonstrukci MVE.

Ekologie při výstavbě MVE

Při výstavbě MVE vznikají ekologické vazby zcela obdobné jako při výstavbě jiných vodohospodářských děl. Nelze se vyvarovat zásahům do přírody, vyvolaným stavbou přivaděčů,

komunikací, zařízením staveniště a vlastní stavební jámou MVE. Některé z těchto zásahů jsou jen přechodné (zařízení staveniště a některé stavební komunikace), ostatní mají charakter trvalý. Většinou jsou to zásahy nevýrazné, snad až na případy, kdy je u MVE třeba budovat náročné přivaděče a odpady, jak tomu bylo dříve například při výstavbě mlýnů. Takové situace jsou však dnes již jen ojedinělé, a to z více důvodů. Náročné přivaděče totiž nepříznivě zatěžují celkovou ekonomiku hydroenergetického díla, výrazně zvětšují zábor půdy, zvyšují nároky na údržbu a ztěžují automatizaci provozu.

Naopak existují koncepce MVE, při jejichž výstavbě téměř nedochází k zásahům do přírodního prostředí. Z nich uveďme především pilířové MVE, kde jsou vodní soustrojí umísťována do rozšířených jezových pilířů, přičemž do břehové části bývá umístěn pouze nepřilíš rozměrný energoblok. Komunikační spojení je zajištěno buď štolou v jezovém tělese, nebo mostem při víceúčelovém využití. Obdobně příznivá je i koncepce přeléváných MVE, které jsou však reálné jen při větších spádech.

Při rozhodování o ekologicky vhodné koncepci MVE bychom proto měli dát přednost pokud možno uvedeným typům MVE. Ale i u ostatních typů MVE je třeba věnovat zvýšenou pozornost omezení záboru půdy a zmenšení rozsahu stavebních prací. Rezervy jsou také v komplexním řešení, plánování a společné realizaci různých staveb, dotýkajících se vodního toku v nepřilíš od sebe vzdálených příčných profilech. V průběhu výstavby MVE jakéhokoli typu, kdy je dnes již nutné plně využít mechanizaci v podobě výkonných stavebních strojů a zařízení, vznikají (jako u veškeré stavební činnosti) rizika znečištění vody a půdy pohonnými hmotami a mazadly. Eliminace těchto rizik je však v silách stavebních organizací. Stačí k tomu jen přísně dodržovat výrobní kázeň a hygienické předpisy. U hydrotechnických a hydroenergetických staveb je třeba tuto striktnost ještě zdůraznit vzhledem k odstrašujícím zkušenostem získaným při ropných haváriích v některých průmyslových závodech, kdy došlo ke kontaminaci podzemních i povrchových vod.

Ekologie při provozu MVE

U soudobých MVE nevznikají za normálního provozu nepříznivé dopady na životní a přírodní prostředí z hlediska rizik při manipulaci s mazadly, chladicími médii a kyselinami. Ztrátové mazání pohyblivých částí mazadly je převážně nebo zcela odstraněno a jsou důsledně zaváděny samomazné prvky mazané vodou. Rovněž olejové náplně jsou omezeny na nezbytné minimum, navíc se instalují zařízení pro zachycení mazadel při havárii a jsou zpřísněny hygienické požadavky na skladování mazadel a manipulaci s nimi. Totéž platí pro skladování a manipulaci s kyselinami, které se používají k údržbě akumulčních baterií. Ekologicky čistě jsou rovněž řešeny všechny ucpávky, obdobně jak je tomu u čerpadel na pitnou vodu. V této souvislosti si je třeba uvědomit, že vyhovují-li ekologicky podle zkušenosti plně čerpadla, není důvodu pochybovat o tom, že u soudobých MVE ekologicky plně vyhovují i profesionálně vyrobené turbíny a ostatní technologická zařízení. Pouze u soustrojí MVE vyrobených amatérsky je třeba naznačeným otázkám věnovat zvýšenou pozornost a opatrnost. Při provozu MVE vždy dochází k větším nebo menším změnám v úrovni horizontu podzemních vod. Tuto okolnost je třeba předem zvážit, aby bylo možné se vyvarovat případů, kdy by v okolí horní zdrže docházelo k podmáčení pozemků, nebo naopak u zahloubeného odpadu k drenážnímu efektu, který by vyvolával přílišné zaklesnutí horizontu podzemních vod. Naznačené dopady je však možné

spolehlivě předvídat a udržet je v přijatelné míře. Někdy lze dokonce změny horizontu podzemních vod pozitivně využít ke zlepšení stavu, který byl dříve, než byla MVE uvedena do provozu. V souvislosti s provozem MVE je třeba se zmínit i o vlivu turbín na kyslíkovou bilanci vody. Předem lze očekávat, že tento vliv bude rozdílný u turbín reakčních (Kaplanových, vrtulových, Thomannových, Francisových) a u turbín akčních (Bánkiho a Peltonových). Zatímco u Bánkiho a Peltonových turbín dochází k výraznému provzdušňování vody, u reakčních turbín se bez speciálních opatření voda neprovzdušňuje.

Ekologie při obnově a rekonstrukci MVE

Při obnově a rekonstrukci MVE je třeba zvážit všechna ekologická hlediska obdobně jako při výstavbě a provozu nových MVE. Důvodem je nutnost respektovat změny, k nimž došlo v období, kdy hydroenergetická díla určená k obnově byla mimo provoz. Uvážíme-li, že v roce 1930 bylo u nás inventarizováno 14 882 hydroenergetických děl, pak se pro obnovu nabízelo tisíce lokalit z této doby. U některých z těchto lokalit se ukázalo, že jsou obtížně obnovitelné nebo rekonstruovatelné právě pro výrazné změny, které nastaly v době po vyřazení původního hydroenergetického zdroje z provozu. Z nejzávažnějších změn, které bránily obnově nebo rekonstrukci těchto děl, lze uvést odvedení podstatné části vody z toku pro jiné uživatele, nepřípustnost změny polohy horizontu podzemní vody v okolí díla, likvidaci vzdouvací stavby, hygienická opatření v pásmu hygienické ochrany zdrojů pitné vody apod.

Pokud neexistují zmíněné závažné překážky, je obnovení ekonomicky efektivního hydroenergetického zdroje žádoucí, např. jako ochrana před exhalacemi z tepelných elektráren. Nebylo by proto správné se vyhýbat obnově ani těch zdrojů, které budou využívat vodu následně používanou i pro pitné účely. Sem patří zdroje, které využívají energii vody v tlakových rozvodech pitné vody (místo tlumičů energie a reduktorů tlaků), nebo zdroje, jež jsou umístěny na tocích zaústěných do nádrže pro pitnou vodu. Při obnově takových zdrojů je ovšem třeba nekompromisně dodržovat pravidla, která zaručí ekologickou čistotu obnovovaného zdroje jak v průběhu obnovy, tak v průběhu nového provozování. To však platí o obnově každého hydroenergetického zdroje.

Z nejzávažnějších opatření, která je třeba v zájmu ekologické čistoty obnovovaného hydroenergetického zdroje dodržovat od počátku rekonstrukčních prací, uvádíme:

- Při rekonstrukci turbín a dalšího technologického zařízení nesmějí být při uvolňování zarezavělých komponentů přímo na lokalitě použity ropné produkty, aby půda a voda nemohly být kontaminovány.
- Ložiska a ucpávky vodní turbíny je třeba upravit tak, aby bylo na minimum omezeno ztrátové mazání, obdobně jak je tomu u čerpadel. To však platí i o ložiscích a ucpávkách obtékaných uzávěrů. Přitom je třeba co nejvíce používat samomazné prvky mazané vodou.
- Odvodnění podlahy strojovny pod mazanými místy nesmí být zaústěno přímo do dolní vody, ale řešeno separátně mimo dosah zaplavení vodou
- Sklad mazadel a ropných produktů se nezřizuje v prostoru strojovny nebo v místech, která mohou být zaplavena vodou.

Kromě ekologických rizik, jimž je třeba se vyhnout dodržením uvedených doporučení, je nutné konstatovat, že obnova hydroenergetických zdrojů je spojena i s ekologickými přínosy. To se do určité míry týká vyvolané údržby vzdouvacího stupně, popř. vyčištění přivaděče a odpadu, a údržby dalších původních objektů, které by jinak chátraly a staly se zdrojem nepořádku a předmětem divokých skládek [10].

6.2 Právní předpisy pro výstavbu MVE

Při přípravě a schvalování územně plánovací dokumentace mohou definovat vhodnost či nevhodnost stavebních záměrů jednotlivé kraje i obce, jelikož se bude jednat o stavby ve vlastním katastrálním území. Výsledkem těchto procesů jsou zásady územního rozvoje na regionální úrovni a územní plány obcí. Pokud investor vodní elektrárny hodlá umístit svůj záměr v katastrální oblasti obce, ve které s tímto typem územních staveb není počítáno, může tento investor vyvolat práci na změnách územního plánu. Bude poté vyzván i k doložení posudku vlivu záměru na krajinný ráz v tomto místě.

K rozhodnutí o umístění stavby je nutné získat i souhlasné stanovisko orgánů ochrany přírody z hlediska vlivů na krajinný ráz a vlivů na významné krajinné prvky, kterými jsou vodní toky, rybníky i údolní nivy. Základním podkladem pro vyhodnocení územního řízení je biologické hodnocení. Eventuálně jiná závazná stanoviska, pokud je záměrem umístit MVE do ochranného pásma chráněných území. MVE však dle zákona nejsou zahrnuty automaticky mezi stavby, které musí podstoupit proces hodnocení vlivů na životní prostředí, ale pokud dotyčný úřad usoudí, že může mít tato stavba negativní vliv na životní prostředí, je oprávněn požádat o zjišťovací řízení.

Podrobnosti k územnímu plánování i k vydání rozhodnutí o umístění stavby upravuje zákon č. 225/2017 Sb., o územním plánování a stavebním řádu [23].

Dalším podstatným soupisem předpisů je zákon č. 544/2020 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon). Tímto zákonem jsou dány především minimální zůstatkové průtoky, či požadavky na rybí přechody.

6.3 Provoz a údržba MVE

Zahájení provozu každé MVE je podmíněno splněním podmínek příslušných energetických provozovatelů distribuční sítě pro připojení nového zdroje na síť. O těchto podmínkách je třeba se informovat předem.

Při zkušebním provozu malých vodních elektráren je nutné počítat s řadou předpokládaných i nepředpokládaných úprav, neboť jde převážně o nová a nevyzkoušená zařízení. Teprve vyřešením nutných úprav a odstraněním závad se optimalizuje provoz a údržba. Protože každý hydroenergetický zdroj má zcela individuální charakter a vytváří unikátní systém, jsou zkušenosti s uváděním do provozu velmi různorodé a jen obtížně lze zobecňovat [10].

7 Výběr vhodného umístění MVE

7.1 Realizace MVE ve vodárenských objektech

Vodní elektrárny jsou relativně stabilní z hlediska dodávky elektrické energie v čase. Průtok se nemění v řádu desítek procent během sekundy a dá se předem dostatečně přesně odhadnout. Částečně lze využít zadržení vody, kterou lze následně využít pro regulaci elektrické soustavy v době pološpičkového a špičkového odběru z elektrické soustavy. Problémem dalšího rozvoje vodních elektráren je skutečnost, že většina vhodných a ekonomicky efektivních lokalit již byla obsazena. Proto je výzvou najít nová technologická řešení, která by umožnila výstavbu na zatím z tohoto důvodu neobsazených lokalitách. Kromě instalace vodních elektráren do vodních toků se nabízí možnost využití hydroenergetického potenciálu přiváděné vody - surové i pitné na výstupu z úpraven vody nebo vodojemů a další kapacity vodárenských procesů (v místech použití redukčních ventilů, ČOV, atd.). Pod koloběhem vody ve vodárenských společnostech rozumíme všechny základní činnosti související s provozováním veřejných vodovodů a kanalizací.

Vodárenské provozy patří mezi energeticky vysoce náročná zařízení. Instalace MVE takový provoz změní na energeticky soběstačný a v mnoha případech umožňují i prodej přebytečné energie do veřejné elektrické sítě. Při instalaci MVE v systémech pitné vody není nutné dlouhodobé přerušení dodávek vody pro obyvatelstvo, ani nemůže dojít k jejímu znečištění. Ekonomická návratnost takových projektu je počítána v řádu dvou až pěti let. MVE instalována na přivaděči do úpravní vody pomáhá v optimalizaci celého procesu úpravy surové vody na vodu pitnou, protože voda, která je po průchodu turbínou odváděna do přerušovací komory, je dobře provzdušněná a po rozvedení v celém prostoru nádrže přispívá k lepšímu promísení dávkovaných činidel s upravovanou vodou. Paralelně k turbíně MVE je připojen tzv. bypass, kterým lze překlenout turbínu při údržbě. Výroba elektrické energie v MVE umístěné ve vodárenských objektech má druhotnou prioritu, na prvním místě je vždy dodávka vody.

Bylo zjištěno, že v roce 2012 bylo v provozu 27 MVE využívaných ve vodárenských provozech. Ve zmíněných 29 MVE ve vodárenských soustavách bylo v roce 2011 vyrobeno celkem cca 22 GWh, součtový instalovaný výkon těchto MVE je cca 7,5 MWe. Nejčastěji používané turbíny v ČR na těchto MVE jsou Bánki, čerpadlové turbíny, Pelton a Francis. Největším producentem elektřiny jsou Severočeské vodovody a kanalizace, a.s. které mají ve svém vodárenském systému instalováno celkem 9 MVE o součtovém instalovaném výkonu 4,25 MWe. Dále to jsou Severomoravské vodovody a kanalizace Ostrava, a.s. s 7 MVE o součtovém instalovaném výkonu 0,9 MWe a ČEVAK a.s. s 5 MVE o součtovém instalovaném výkonu 0,85 MWe. Následuje Středomoravská vodárenská a.s. s 4 MVE o součtovém instalovaném výkonu 0,15 MWe, Pražská vodohospodářská společnost a.s. s 2 MVE o součtovém instalovaném výkonu 0,44 MWe a Ostravské vodárny a kanalizace a.s. a Vodárenská společnost Chrudim, které mají ve svých vodárenských systémech po 1 MVE.

Na Obr. 27 je možné vidět soustrojí tří asynchronních generátorů spojených s čerpadly v reverzibilním provozu (turbínovém). Toto soustrojí je součástí MVE ve vodárenském systému Vyšní Lhoty [5].

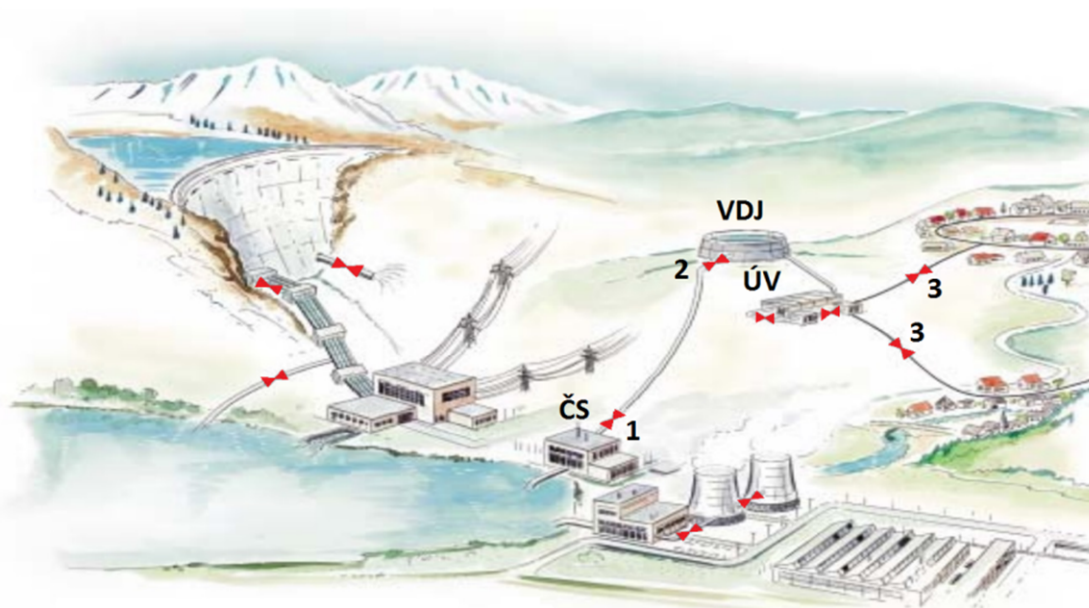


Obr. 27 - Pohled na soustrojí MVE Vyšní Lhoty

Ve vodárenských systémech se využívá mnoho řídicích a regulačních prvků, např. jako je uvedeno v kap. 5.2, vodovodní řad je rozdělen do mnoha tlakových pásem. V drtivé většině vodovodních sítí je nutné dodatečně regulovat tlak, popř. průtok, za účelem snížení hodnoty hydrostatického tlaku (či průtoku) v potrubí v požadovaných mezích, tato regulace tlaku (průtoku) je prováděna mařením přebytečné energie vody.

Funkci regulačních armatur mohou zastoupit i MVE, které jsou schopny převést energii vody na elektrickou energii, využitelnou v místě pro vlastní spotřebu náročných technologických celků. MVE ve vodovodních řadech mají i další benefity.

Ukázka možných pozic umístění regulačních armatur, je zobrazena na Obr. 28.



Obr. 28 – Ukázky možných umístění regulačních armatur [11]

ČS – čerpací stanice, VDJ – vodojem, ÚV – úprava vody, 1 – redukční armatura průtoku, 2 – redukční armatura pro udržení výšky hladiny ve vodojemu, 3 – redukční armatura tlaku

Mohou být stanoveny základní požadavky na regulační armatury:

- regulace tlaku,
- regulace průtoku,
- regulace úrovně hladiny.

Příklad použití regulačních armatur v bodě 1 na Obr. 28:

Základní regulace průtokových množství při vyšších diferenčních spádech na základě principu lineárního škrcení. Eliminace náběhových tlakových špiček, aniž by vznikaly vibrace, nepříjemné hranice hluku nebo škody na potrubním systému vlivem kavitačních erozí.

Příklad použití regulačních armatur v bodě 2 na Obr. 28:

Při plnění vodojemů tlakovým potrubím z čerpacích stanic nebo prostřednictvím gravitačních přivaděčů, je nutné zajistit maření energie vody a regulovat průtok v přímé vazbě na požadovanou výšku hladiny dle aktuální spotřeby. Děje se to na základě snímání výšky či tlaku vodního sloupce s převodem signalizace na servopohon vhodné regulační armatury.

Příklad použití regulačních armatur v bodě 3 na Obr. 28:

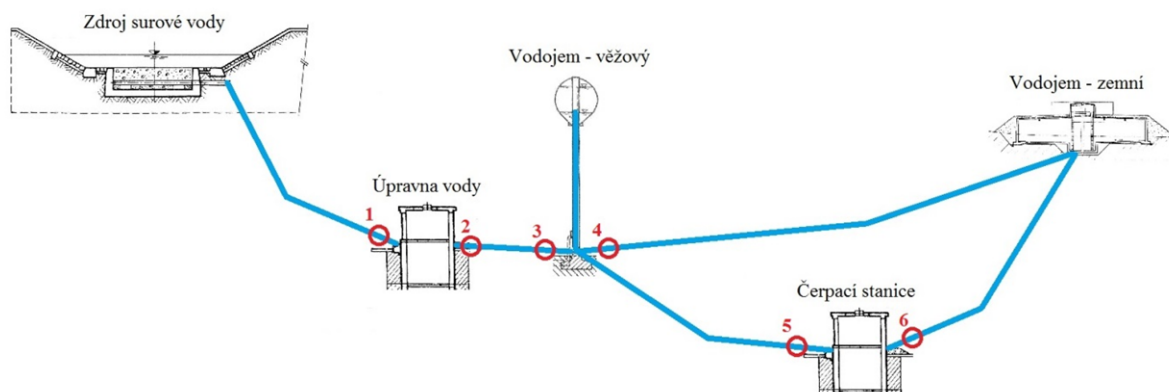
Každá ze dvou osad leží v různé nadmořské výšce vzhledem k poloze čerpací stanice. Proto je nutné nastavit různá tlaková pásma na jednotlivých přivaděčích, použitím regulačních ventilů.

Hodnoty tlakových úrovní mohou být nastaveny následujícím způsobem:

- fixní nastavení konstantního tlaku v průběhu 24 hod,
- dvoustupňové nastavení tlaku - denní režim, - noční režim,
- pružná modulační regulace tlaku v závislosti na hodině denního odběru (PID) [11].

Návrh umístění MVE ve vodárenském systému

V předešlé části této kapitoly 7 je uvedena možnost umístění MVE na místo regulačních armatur, toto je vhodné z důvodu využití zbytečně marněné energie vody v regulačních armaturách. Jsou tu však další možnosti umístění MVE ve vodárenských systémech. Ne vždy je nutné regulovat úroveň tlaku (průtoku) na požadovanou hodnotu v místech kde lze umístit MVE. Příklad tohoto umístění je na Obr. 29. Jak je patrné z obrázku ve vodovodním systému je mnoho vhodných míst, kde lze umístit MVE. Ve znázorněných ukázkách se nejedná jen o umístění, která jsou vhodná ze spádových, či průtokových poměrů ve vodovodním řadu. Ale některé umístění mají i další pozitivní vlivy na vodovodní systémy, jako např. v bodě 2 má MVE pozitivní vliv na mísení aditiv, přidávaných do vody z hygienických důvodů. V ostatních bodech: 1, 3, 4, 5 a 6 je využito vysokých spádových hodnot vodovodní sítě.

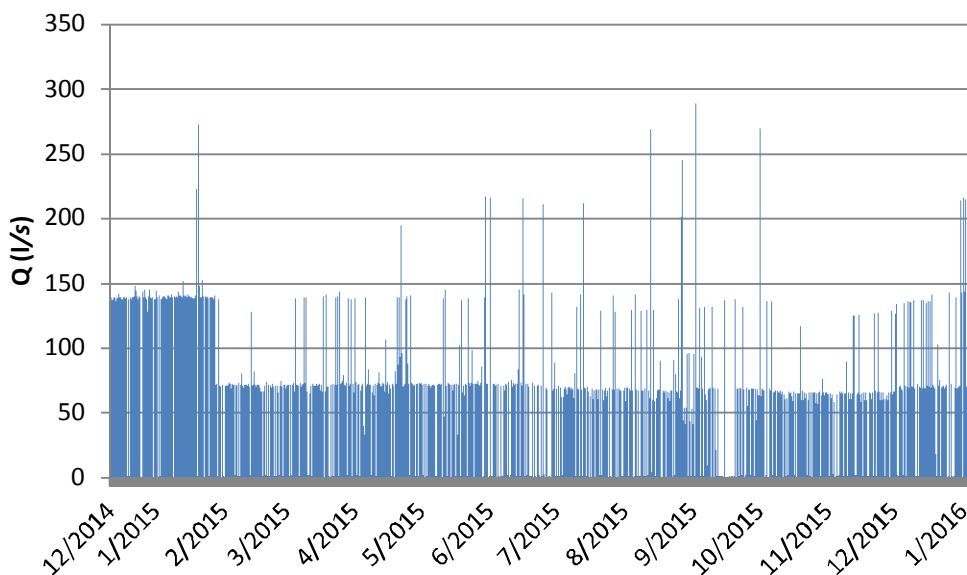


Obr. 29 – Návrh možných míst umístění MVE ve vodovodním systému

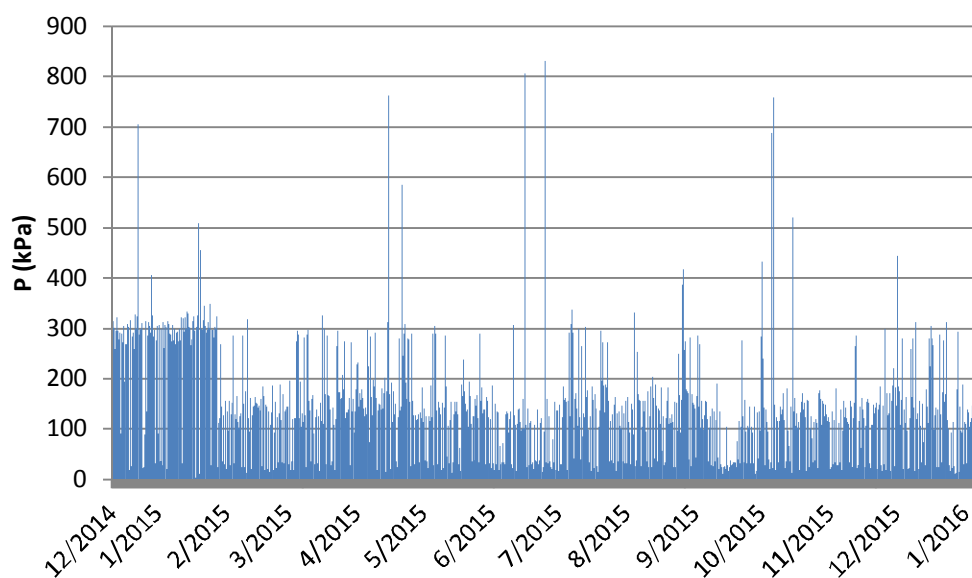
7.2 Posouzení vhodnosti umístění MVE

Pro správné umístění MVE ve vodárenském objektu je nutné provést souhrnné posouzení hydraulického potenciálu vodního toku. Předmětem posouzení je lokalita umístěná ve vodárenském systému. V této lokalitě je možné využít hydraulického potenciálu vody tekoucí přivaděčem z přehrady do vodárenského areálu. Využitelný spád ve vodárenském areálu je 80 m.

V tomto místě možného využití energetického potenciálu bylo provedeno vyhodnocení průtoků a tlaků v hodinových intervalech v období prosinec 2014 – leden 2016.

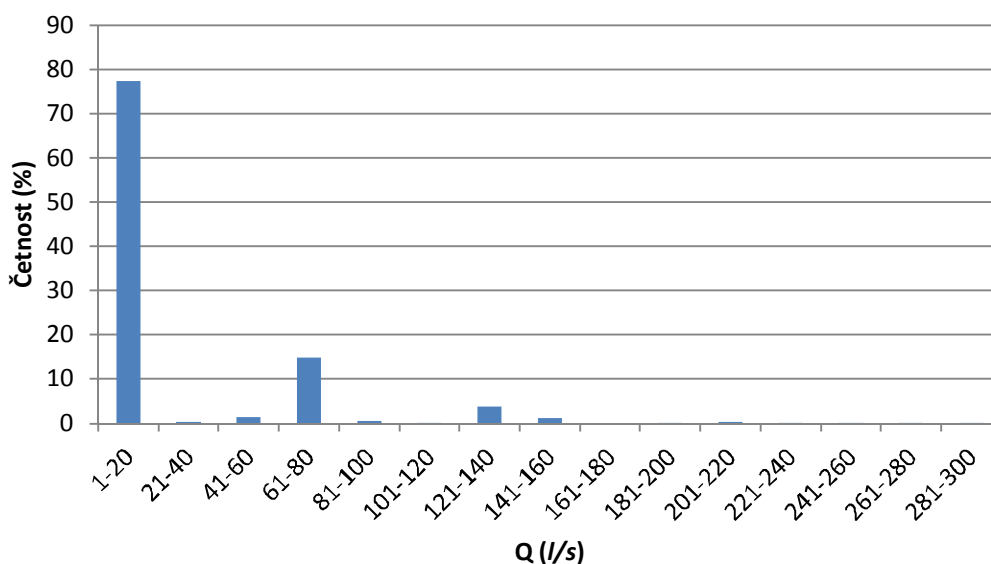


Obr. 30 – Přehled průtoků přivaděčem v měřeném období



Obr. 31 - Přehled tlaků na konci přivaděče v měřeném období

Pro určení správného typu turbíny pro MVE je nutné znát základní vlastnosti vodního toku, jde především o využitelný spád a předpokládaný průtok turbínou. Průtok vody vstupující do turbíny se značně mění v průběhu provozu MVE, tato změna průtoku je u MVE umístěných ve vodárenských objektech markantnější. Průtok vodovodním řadem značně kolísá v důsledku nestabilní poptávky o vodu. Pro vhodné zvolení turbíny je nutné znát průtokový profil vodního toku, z naměřených hodnot toku je možné sestavit graf četnosti průtoků.



Obr. 32 – Četnost průtoků přivaděčem ve vybrané lokalitě

Z Obr. 32 je patrné, že ve vybrané lokalitě se v drtivé většině, přibližně v 95 % objevuje průtok do 80 l/s. Tento maximální průtok je možné zvolit jako hlnost turbíny. Pokud by se vyskytovaly častěji průtoky nad stanovenou hlnost turbíny, je možné zřídit více paralelních soustrojí turbína – generátor, která budou odstupňována hlností turbín, tak aby byla využitím pokryta požadovaná

četnost průtoků. V tomto konkrétním případě je vhodné zvolit pouze jedno soustrojí turbína – generátor s hltností turbíny 80 l/s. Součástí každé vodní elektrárny je regulace, která řídí chod vodní elektrárny dle kolísání vstupních i výstupních parametrů této vodní elektrárny. Výroba elektrické energie ve vodárenských objektech má sekundární prioritu, prvotní je dodávka vody vodovodním řádem, proto je umístěn tzn. bypass turbíny v MVE, kterým je možné odklonit tok vody mimo turbínu. Tímto bypassem je možné odklonit tok vody i při překročení hltnosti turbíny. Bypass je důležitý také při potřebě servisu soustrojí v MVE.

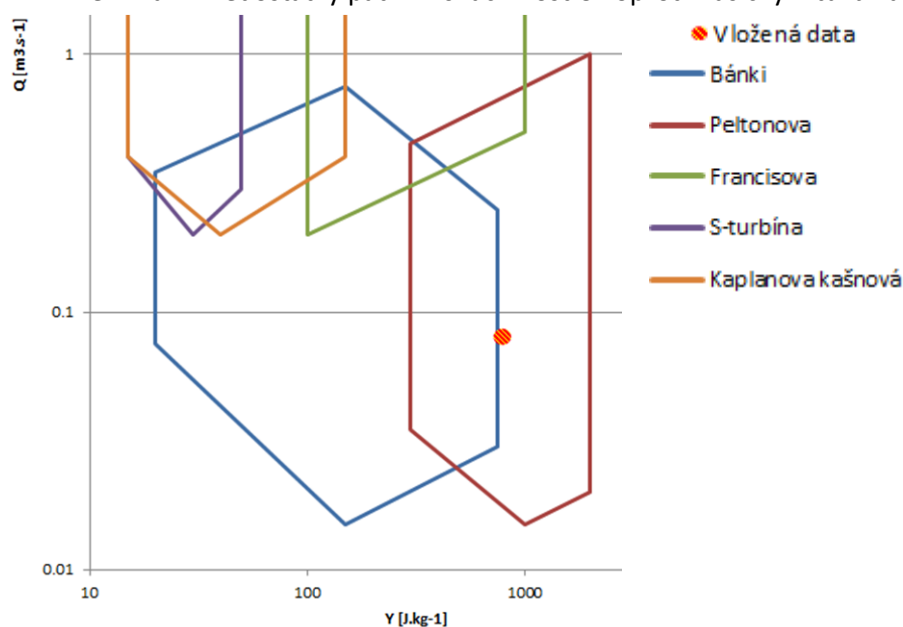
Vložením hltnosti turbíny 80 l/s a daného spádu 80 m do vytvořené aplikace pro výběr vhodné turbíny, je doporučovaným typem turbíny Peltonova turbína.

Díky nízké ceně sériově vyráběných čerpadel se mohou tyto čerpadla v turbínovém režimu (ČT) využít jako turbíny.

Mezi přednosti čerpadel, využívaných v turbínovém režimu patří především:

- mnoho typů odstředivých čerpadel vyráběných sériovou výrobou
- dostupnost náhradních dílů
- rychlá dostupnost
- velmi příznivá cena ve srovnání s turbínami

Mezi hlavní nedostatky patří nižší účinnost ČT oproti klasickým turbínám.



Obr. 33 – Doporučený typ turbíny ve vybrané lokalitě

Výsledek vhodné turbíny vytvořenou aplikací je možné vidět výše na Obr. 33, předpokládaný výkon generátoru MVE je přibližně 44 kW při zvolené celkové účinnosti MVE 70 %. MVE dle předpokládaného výkonu generátoru patří do mikro vodních elektráren.

Ve většině MVE se využívá asynchronní generátory díky spolehlivosti, minimu pohyblivých částí, dostupnosti, jednoduchém umístění do strojovny bez nutnosti použití přídatných zdrojů, tak jak je tomu u synchronních generátorů. Hlavní nevýhodou asynchronních generátorů je nemožnost použití

v ostrovním režimu, tato nevýhoda se však u MVE neuplatňuje, protože MVE nejsou konstruovány jako primární zdroje elektrické energie, které by měly dodávat elektrickou energii při „blackoutech“.

Pro vybranou lokalitu jsem vybral typ generátoru asynchronní generátor. Díky pomocné aplikaci jsem vybral vhodné ochrany tohoto generátoru:

- 1) Nadproudová zkratová časově nezávislá – ochrana může být s odblokováním při podpětí, pro $P < 500$ kW lze použít jistič
- 2) Přetížení statoru
- 3) Nadpětíová – kmitočtově nezávislá, u vn alternátorů dvoustupňová
- 4) Podpětíová
- 5) Zpětná wattová – pouze u zařízení bez trvalé obsluhy, pro výkony nad 30 kVA
- 6) Nesouměrné zatížení – ochrana se doporučuje
- 7) Nadkmitočtová – ochrana se doporučuje
- 8) Kontrola roztočení – použije se v přečerpávacích vodních elektrárnách s asynchronním rozběhem soustrojím
- 9) Nadproudová kompenzačních kondenzátorů

Obr. 34 – Doporučení ochrany asynchronního generátoru ve vybrané lokalitě

MVE s výstupním výkonem do stovek kilo wattů se obvykle připojují přímo do distribuční soustavy provozovatele (PDS) na hladinu napětí 400 V, nevyužívají se měniče, či jiné přístroje upravující hladiny napětí. Mezi generátorem a distribuční soustavou (DS) je zařazeno samozřejmě mnoho jisticích a ochranných prvků. Možné připojení generátoru do DS je zobrazeno na Obr. 35.

8 Připojení k sítí provozovatele distribuční soustavy

Při zřizování výroby elektrické energie je nutné dbát na platná nařízení a předpisy, na to, aby byla vhodná pro paralelní provoz se sítí provozovatele distribuční soustavy (PDS), také musí být vyloučeno rušivé působení na síť, nebo zařízení odběratelů.

Při zřizování a provozu elektrických zařízení je nutné dodržovat:

- platné zákonné a úřední předpisy
- platné normy ČSN, PNE, případně PN PDS
- předpisy pro ochranu pracovníků a bezpečnost práce
- nařízení a směrnice PDS

Nová výroba elektrické energie připojovaná k distribuční soustavě (DS), musí být připravena k instalaci dálkového ovládání, tj. k instalaci komunikačního ovládacího obvodu mezi elektroměřovým rozvaděčem a novou výrobnou.

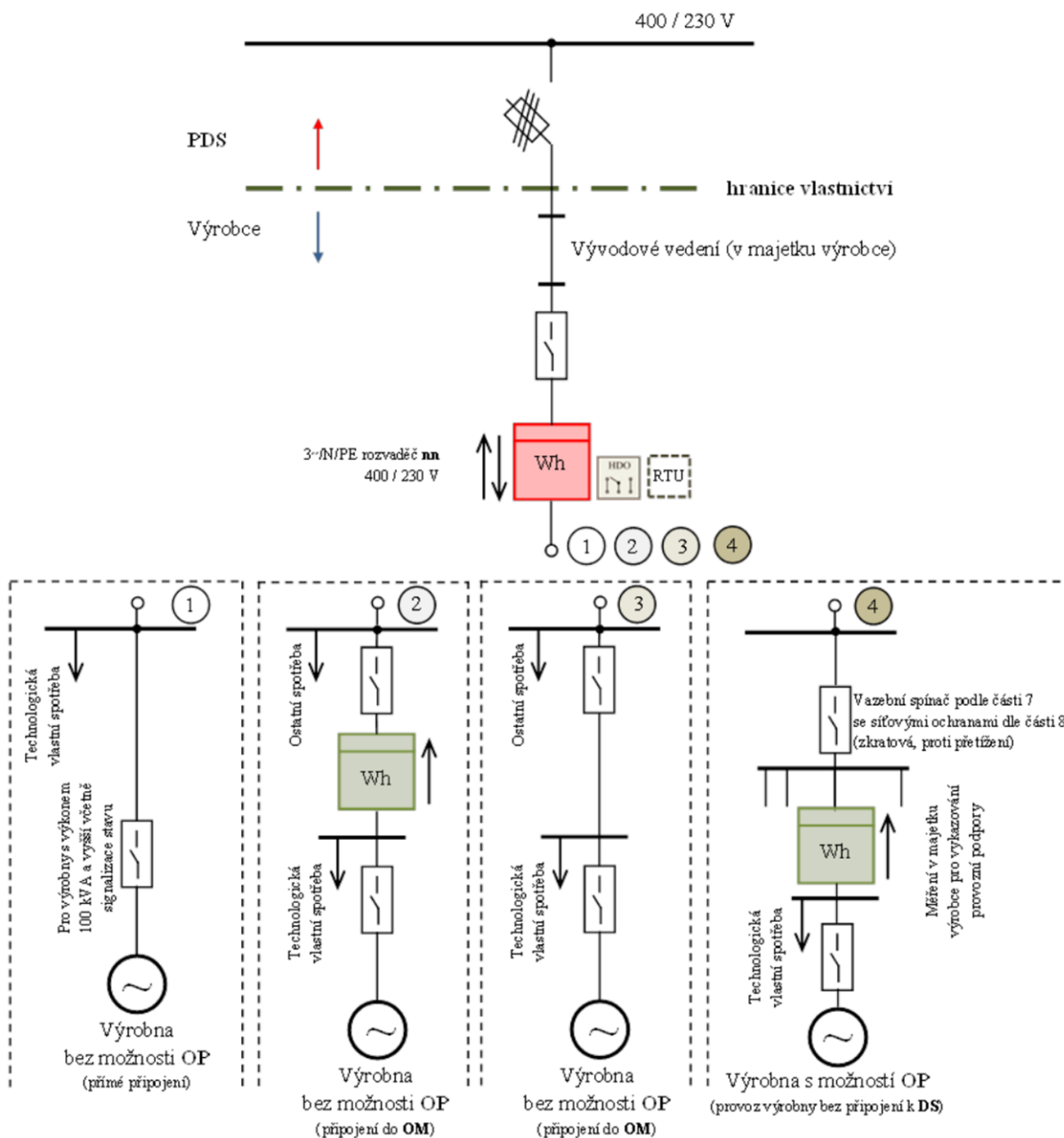
U výroben s instalovaným výkonem 100 kVA a více musí být instalován spínač s funkcí oddělení, vybaven dálkovým ovládáním se signalizací stavu.

Místo a způsob připojení na síť, stejně tak napěťovou hladinu, výši rezervovaného výkonu PDS.

Výrobu elektrické energie je možné připojit:

- přímo k DS
- v odběrném místě
- v předávacím místě jiné výroby [27].

Je možné uvést příklad připojení výroby elektrické energie na napěťovou hladinu nn, připojení výroby elektrické energie přímo k DS [27].



Obr. 35 - Připojení výroby elektrické energie na napětovou hladinu nn [27]

9 Návrh strojní části MVE

9.1 Turbína

Zájem o využití energetického potenciálu je patrný již delší dobu. Již na počátku 80. let 20. století se v bývalém Československu začaly obnovovat malé vodní elektrárny (MVE) a v této souvislosti se začaly vyvíjet také technologie pro vodárenské soustavy. Nejdříve se započalo s vývojem vodních strojů. Ukázalo se, že problematika strojů není zdaleka tak jednoduchá, jak by se zdálo na první pohled. Vodní energetika se během 19. a první poloviny 20. století posunula cestou hlavně extenzivního rozvoje do jednotek velkých výkonů a dřívější potřeby pohonu malých strojů jako vodních mlýnů, hamrů, stoup a podobných prakticky zanikly. Návrat k výkonově malým strojům cestou pouhého zmenšení stávajících sofistikovaných velkých strojů byl hlavně z ekonomických důvodů prakticky nemožný. Proto se hledala nová, technickoekonomicky výhodná řešení, obecně pro segment malých vodních elektráren. Sektor vodárenských zařízení má svoje specifika, která můžeme principiálně definovat dvěma systémovými požadavky:

- Vodní energetika nesmí komplikovat a negativně ovlivňovat primární vodárenskou technologii, která je vždy prioritní.
- Hygienické požadavky na vodní energetiku jsou mnohem přísnější než u MVE.

Proto se nejdříve uplatnily technologie pro jednodušší aplikace, jako je například využití energie napouštění surové vody z vodárenských nádrží do úpraven vod s větší kapacitou akumulace. V těchto případech se ukázalo velice výhodné použití vodních turbín odvozených ze sériově vyráběných čerpadel relativně snadným vývojem.

Řada renomovaných výrobců čerpadel má ve svém produkčním programu větší počet typových řad s dostatečným počtem typových velikostí čerpadel přímo určených pro vodárenské účely. Cíleným vývojem byla prováděna selekce strojů s velmi dobrými turbínovými charakteristikami a dopracovány modifikace strojů pro podmínky turbínového provozu [5].

Výběr vhodné turbíny pro MVE ve vodárenských objektech

U MVE ve vodárenských objektech se používá mnoho typů vodních turbín, lze se setkat s nejrozšířenějšími typy vodních turbín: Bánkiho, Kaplanovou, Francisovou, Peltonovou turbínou, nebo také s čerpadlem, které běží v turbínovém režimu. Výběr vhodné turbíny je komplexní proces, se zaměřením na různé aspekty, pro výběr vhodné turbíny jsou např. důležité tyto požadavky:

- specifické otáčky turbíny,
- rozsah využitelných spádů a průtoků (rozsah oblasti v H/Q diagramu),
- výkon turbíny,
- účinnost při místním spádu a průtoku.

Před zahájením samotného výběru vodní turbíny pro MVE nutné soustředit spád a průtok do místa budoucí polohy této MVE. Samotný vodovodní řad je projektován na předem požadované průtokové a spádové (tlakové) poměry, které vyhovují provozu této vodovodní sítě. Proto jsou již při výběru vhodného místa pro MVE ve vodárenských objektech známy spádové a průtokové poměry

v tomto místě. Popis výběru vhodného umístění MVE ve vodárenských objektech je naznačen v kap. 7.

Specifické otáčky lze vypočítat ze vztahu (1):

$$n_s = \frac{n}{H} \cdot \sqrt{\frac{1000 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t}{75}} \quad (min^{-1}) \quad (1)$$

kde: n_s – specifické otáčky turbíny (min^{-1})

n – provozní otáčky turbíny (min^{-1})

H – hrubý spád (m)

Q – průtok turbínou ($m^3 \cdot s^{-1}$)

η_t – účinnost turbíny (–)[6]

Pro výpočet specifických otáček dle vztahu (1) již známe spádové a průtokové poměry, které jsou dány parametry vodovodního řadu. Provozní otáčky turbíny jsou požadované otáčky, tyto otáčky by měly být tedy také předem známe. Požadované provozní otáčky závisí na požadovaných otáčkách generátoru elektrické energie, popř. na požadovaných otáčkách převodu.

Účinnost turbíny může být stanovena dle vztahu (2), hodnota účinnosti se však u dobře navržených turbín a optimálních hodnot průtoku a spádu pohybuje v rozmezí $\eta_t = 0,8$ až $0,94$. Přitom čím větší je výkon turbíny, tím vyšší účinnosti zpravidla dosahují.

$$\eta_t = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad (–) \quad (2)$$

kde: η_t – celková účinnost turbíny (–)

η_h – hydraulická účinnost (–)

η_v – objemová účinnost (–)

η_m – mechanická účinnost (–)[6]

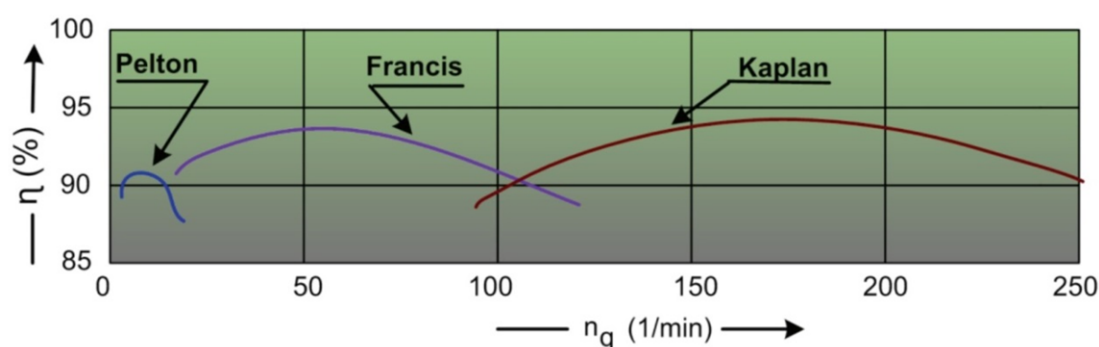
Rozsah využitelných spádů a průtoků je důležitý parametr při výběru vhodné turbíny pro MVE, existuje mnoho typů vodních turbín, viz kap. 4.4. Každý ze zmíněných typů má své pásmo optimálního provozu zobrazené na H/Q (Y/Q) diagramu (Obr. 39), proto je důležitý provoz turbíny v tomto pásmu. Turbína by měla být také vhodně vybrána s ohledem na možnost kolísání spádu a průtoku turbíny.

Výkon turbíny je výše možného zisku mechanické energie na hřídeli turbíny z potenciálu energie vody, dle vztahu (3). Popis dosazení spádu a průtoku se shoduje s popisem, který je uveden na začátku této podkapitoly, tyto hodnoty jsou známy z parametrů vodovodního řadu.

$$P = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (W) \quad (3)$$

kde: P – teoretický výkon (W)
 ρ – měrná hmotnost vody ($kg \cdot m^{-3}$)
 g – gravitační zrychlení ($m \cdot s^{-2}$)
 H – hrubý spád (m)
 Q – průtok turbínou ($m^3 \cdot s^{-1}$) [6]

Účinnost při místním spádu a průtoku je další z důležitých parametrů při výběru vodní turbíny MVE ve vodárenských objektech. Účinnost dané turbíny není při jejím provozu vždy konstantní. Turbína je konstruována vždy tak, že je její nejvyšší účinnost při daných otáčkách, při změně těchto otáček dochází ke snížení účinnosti. S tímto parametrem se při návrhu turbíny MVE musí počítat. Nejhodnější je dlouhodobá analýza spádových a průtokových parametrů dané lokality, provést vyhodnocení spádů a průtoků, dle nejčastěji se vyskytujících hodnot vybrat vhodný typ turbíny. Kolísání účinnosti často využívaných turbín MVE lze pozorovat na Obr. 36.



Obr. 36 – Změna účinnosti turbíny při změně provozních otáček [12]

Pomocná aplikace pro výběr vhodné turbíny MVE

Na základě získaných znalostí při studiu problematiky týkající se MVE popř. MVE ve vodárenských objektech, mě napadla myšlenka vytvoření pomocné aplikace, která by mohl pomoci při výběru typu vodní turbíny a dalších základních parametrů. Tato aplikace je vytvořena v rozšířeném kancelářském softwaru Microsoft Office – Excel. Součástí aplikace není jen nastíní vhodného typu turbíny pro MVE, ale také znázornění do jaké skupiny bude tato MVE zapadat. Na Obr. 37 je znázorněna titulní strana pomocné aplikace, zde je základní popis vlastností a představení autora.

Doporučení vhodné turbíny MVE, výpočet výkonu generátoru, doporučení ochrany podle ČSN 33 3051 a pravidel provozovatele (ČEZ, E.ON)	
Autor:	Martin Král
Email:	martin.kral.st3@vsb.cz
Působnost:	Student prezenčního doktorského studia na katedře elektroenergetiky fakulty FEI
Popis aplikace:	Tato aplikace usnadňuje výběr vhodné vodní turbíny při návrhu malé vodní elektrárny (MVE). Po zadání předpokládaného objemového průtoku a měrné energie MVE (list: Vstupní data, ochr. dle ČSN), aplikace zobrazí bod ideálního výběru v oblastním diagramu použití jednotlivých turbín (list: Oblastní diagram použití). Dále vypočte předpokládaný výkon MVE resp. výkon generátoru, díky známé výkonové hodnotě generátoru lze doporučit ochrany podle ČSN 33 3051 (list: Vstupní data, ochr. dle ČSN) a pravidel provozovatele (ČEZ, E.ON) viz. list: Ochr. dle provozovatele. K náhledu je i grafické zařazení předpokládané vodní turbíny podle výkonu (list: Rozdělení MVE podle výkonu).

Obr. 37 – Titulní strana pomocné aplikace

Vkládané parametry:

Parametry vodního toku- nutno doplnit

Objemový průtok Q : 2 [m³.s-1]
 Měrná energie Y : 300 [J.kg-1]

Vypočtené parametry:

Výpočet výkonu generátoru MVE

Odhad výkonu generátoru MVE P : $P = Q \cdot Y \cdot \eta_c$ [kW]

kde:

Q - objemový průtok [m³.s-1]
 Y - měrná energie [J.kg-1], $Y = g \cdot H$
 η_c - celková předpokládaná účinnost (pro MVE 0,5-0,7)

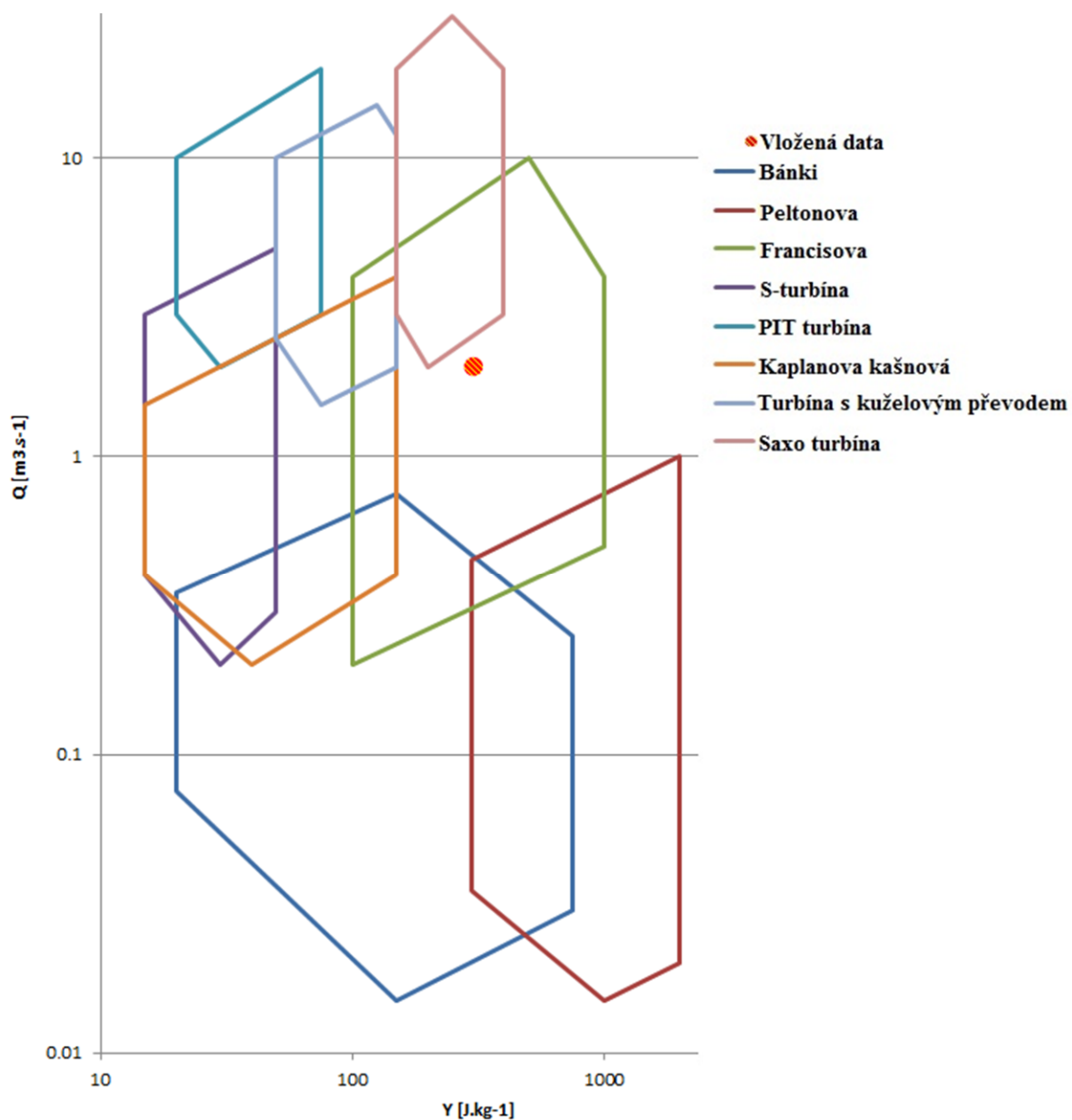
$\eta_c =$ 0.7

$P =$ 420 [kW]

Obr. 38 – Zobrazení strany s vstupy pomocné aplikace

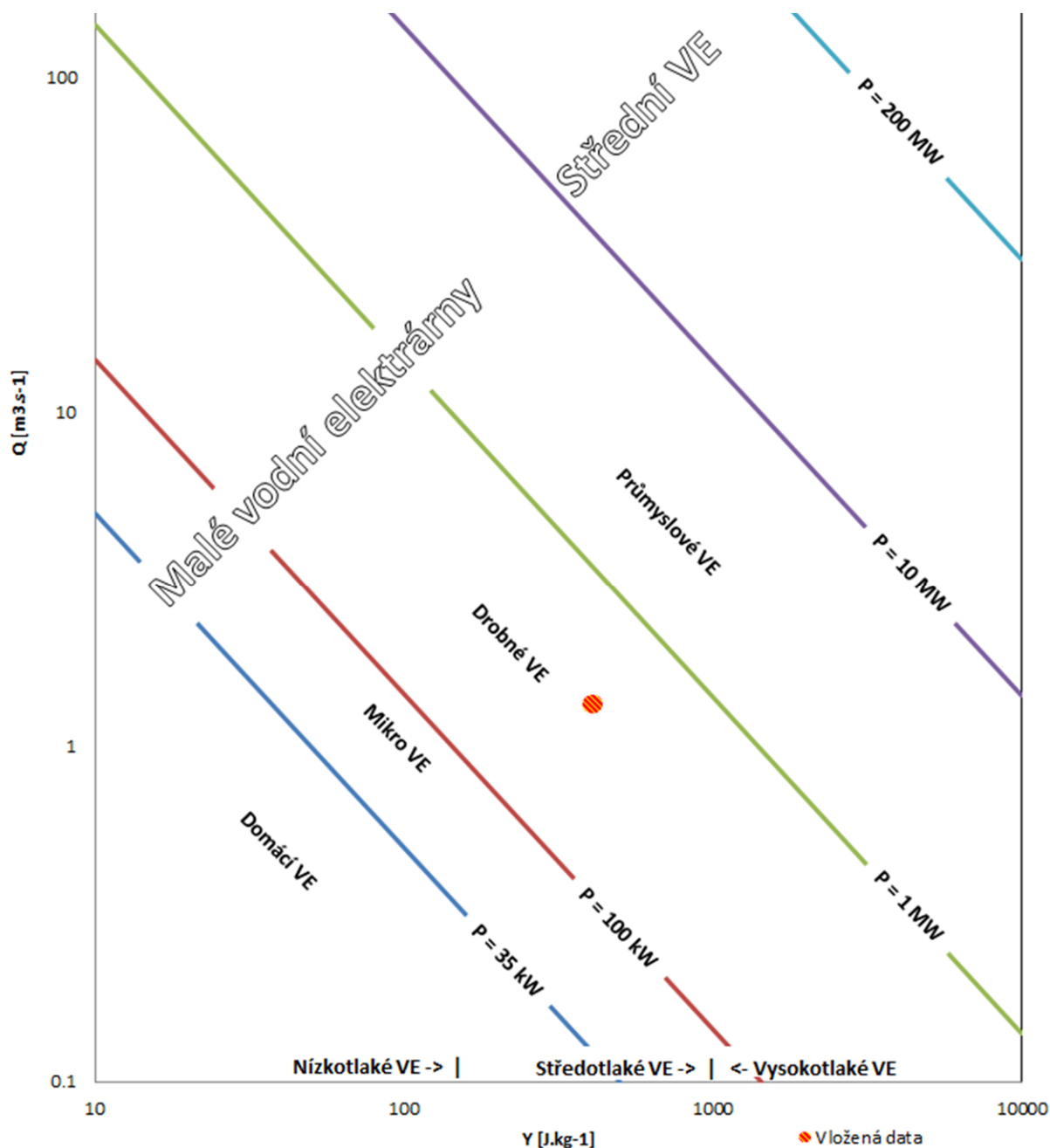
Pro znázornění vhodné turbíny MVE je nepostradatelné vložení parametrů vodního toku, v tomto případě se zadává průtok a měrná energie vody. Informace související s částí doporučení ochrany je uvedeno v kap. 10.4.

Na Obr. 39 je poté zobrazen Y/Q diagram s pracovními oblastmi základních typů vodních turbín. Dle vložených dat spádu a průtoku vodního toku, pro který chceme doporučit turbínu, je zobrazeno doporučení označené kruhem s červeno žlutou výplní a popisem vložená data. V Y/Q diagramu jsou zobrazeny nejvyužívanější turbíny vodních elektráren. Výhoda tohoto zobrazení je v grafickém zobrazení, není striktně zobrazen jeden typ turbíny, ale osoba využívající tuto aplikaci může dle svých preferencí zvolit vhodnou turbínu.



Obr. 39 – Zobrazení doporučené turbíny MVE pomocnou aplikací

Po vložení vstupních dat s hodnotou průtoku $Q = 2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a hodnotou měrné energie $Y = 300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ je zobrazen návrh turbíny. V tomto případě je ideální volba Francisova turbína.



Obr. 40 - Zobrazení zařazení MVE dle výkonu pomocnou aplikací

Díky vložení dat do pomocné aplikace je také v této aplikaci uvedeno, do jaké kategorie vodních elektráren dle výkonu generátoru patří tato MVE. Z výše uvedeného obrázku je vyznačeným bodem patrné, že tato MVE patří do kategorie drobných MVE.

Pomocná aplikace vychází z poznatků publikovaných na konci 20. století.

Provedení kontroly funkčnosti aplikace na reálných objektech

Aplikaci jsem pro kontrolu podrobil testu na reálných datech stojících MVE, výsledky jsem porovnával s daty v databázi: <http://mve.energetika.cz/uvodp/vod-dila.htm>. Zkoušku jsem provedl na stovkách případů. Pro ukázkou je v Tab. 7 zobrazen malý vzorek výsledků porovnání. Je patrné, že

se výsledky ne vždy shodují s reálnou situací, tyto nesrovnalosti mají svoji podobnost a vždy můžeme pozorovat nesrovnalost při výběru jedné z dvojice turbín: Kaplanova – Francisova a Bánki – Peltonova. Skutečný stav se přiklání k první ze jmenovaných, tedy Kaplanova a Bánki. Tuto nesrovnalost si vysvětlují investičními nároky a složitostí výroby turbín. Typy turbín navrhované pomocnou aplikací jsou výsledkem technického hodnocení vstupních dat, tento návrh je nutné posoudit z pohledu investora.

Tab. 7 – Vzorek porovnávaných MVE s pomocnou aplikací

Tok	Adresa	Průtok ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Měrná energie ($J \cdot s^{-1}$)	Instalovaný typ turbíny	Doporučený typ turbíny aplikací	Inst. výkon (kW)	Spočítaná účinnost (%)
Žibřidovický potok	Pusté Žibřidovice 71	1,25	106,4	Francisova	Francisova	93,68	70
Oslava u Sovince	Hor.Dlouhá Loučka 11	0,4	39,2	Kaplanova	Kaplanova	11,84	76
Odra	Německý Jeseník 116	1,6	39,2	Kaplanova	Kaplanova	51,80	82
Velička	Hranice n.Mor.	0,29	51,5	Francisova	Kaplanova	11,54	77
Morava	Potůčník	0,04	39,2	Peltonova	Bánki	1,18	75
Morava	Kopřivná 50	0,05	98,1	Peltonova	Bánki	3,59	73
Třebůvka	Loštice 78	1,5	26,5	Francisova	Kaplanova	31,08	78
místní přítok Odry	Rudoltovice 82	0,12	39,2	Peltonova	Bánki	3,55	75
Desná	Rejhotice 48/52	1,35	60,8	Kaplanova	Kaplanova	66,60	81
Bečva	Hustopeče nad Bečvou 117	0,9	31,4	Francisova	Kaplanova	20,72	73

Ukázka využitelnosti aplikace pro výběr turbíny MVE ve vodárenských objektech

K ukázce použití pomocné aplikace využiji schéma vodovodního řadu, viz Příloha A. V tomto případě budu navrhovat vhodnou turbínu, která bude umístěna před čerpací stanicí ČS1. V místě umístění MVE je soustředěn spád $H = 42$ m, průtok je zde $Q = 1340 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1,34 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Po vložení zjištěných dat do aplikace, je zobrazovaný výsledek téměř totožný jako na Obr. 39, takže je zde jednoznačně doporučitelná Francisova turbína, která bude mít při zadaných parametrech nejvhodnější pro dané umístění.

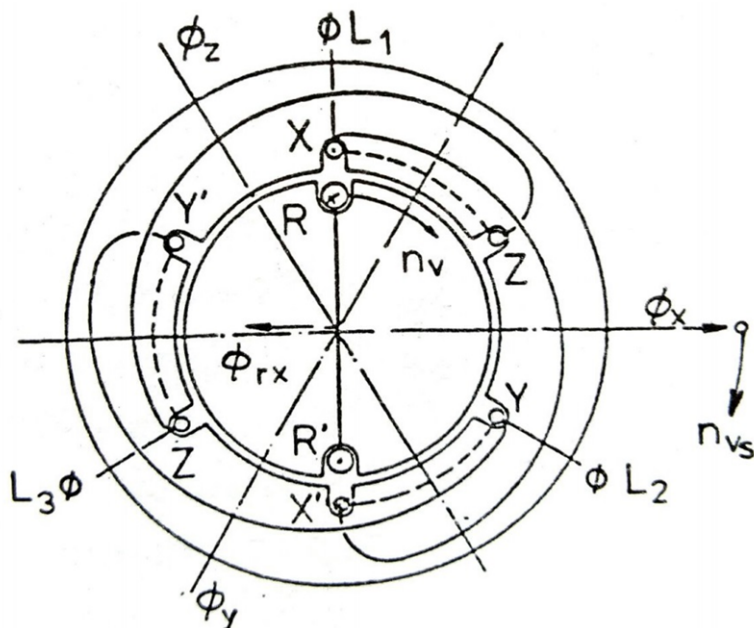
9.2 Generátor

Asynchronní generátor

Asynchronní stroj (Obr. 41), tak jako se s ním můžeme nejčastěji setkat, je trojfázový indukční stroj s prostorově rozloženým statorovým vinutím jednotlivých fází tak, že v případě připojení na třífázovou síť ve stroji vzniká točivé magnetické pole. Ve vinutí rotoru stojícího stroje se indukuje budící proud, jehož magnetické pole se snaží sledovat točivé pole statoru a stroj se roztáčí. V případě, že by došlo k synchronnímu otáčení rotoru s točivým polem statoru, nebude v rotoru indukován potřebný budící proud. Z tohoto důvodu je pro funkci stroje potřebné asynchronní otáčení rotoru vůči točivému poli statoru. Právě asynchronní otáčení rotoru vůči magnetickému poli statoru dalo jméno těmto strojům. V případě, že otáčející se rotor je mechanicky zatěžován, mluvíme o asynchronním motoru. V případě, že naopak je rotor poháněn, mluvíme o asynchronním generátoru.

Asynchronní generátor se v zásadě nikterak neliší od běžného asynchronního motoru, který každý zná z běžné praxe - pohon cirkulárky, čerpadla apod. V našem případě vodních elektráren je asynchronní stroj mechanicky spojen s pohonnou jednotkou - vodní turbínou. Tedy, připojením asynchronního motoru k turbíně se stává tento stroj asynchronním generátorem. Někteří výrobci již ve výrobě respektují rozdílné namáhání a napěťové poměry na asynchronním motoru v generátorickém provozu, a pak již v katalogové dokumentaci hovoří o asynchronním generátoru.

Jednotlivé asynchronní generátory se liší svým mechanickým a elektrickým provedením. V praxi se setkáváme nejčastěji s asynchronními generátory s kotvou nakrátko, Výjimečně s kotvou kroužkovou. Jedná se pouze o rozdílné provedení rotorového vinutí. Dále se jednotlivé generátory liší výkonem, počtem jmenovitých otáček, provedením statorového vinutí, mechanickým provedením krytu, uchycením stroje apod. [6].



Obr. 41 – Ukázka asynchronního stroje [6]

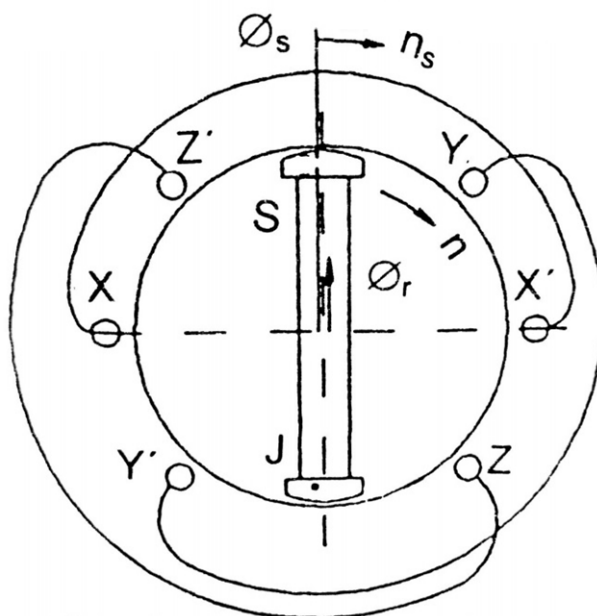
Synchronní generátor

Synchronní stroj (Obr. 42), tak jak se s ním můžeme nejčastěji setkat, je stroj jehož třífázové statorové vinutí má geometrické rozdělení takové, že při napájení třífázovým napětím sítě vytváří točivé magnetické pole.

V rotoru synchronního stroje je v podstatě stejnosměrný elektromagnet, který synchronně sleduje magnetické pole statoru, a tedy se s ním synchronně otáčí. Stejnosměrný elektromagnet rotoru napájen z obvodu stejnosměrného napětí, které nazýváme budicí obvody.

Synchronní generátory jsou takřka výhradními zdroji elektrické energie ve velkých elektrárnách. U malých nově vznikajících elektráren se s nimi málokdy setkáváme pro jejich vyšší cenu a zdánlivě větší složitost při řešení automatizace provozu a ochran.

Naopak, často se s nimi můžeme setkat při rekonstrukcích starších MVE, kde se povětšinou vyskytují právě tyto generátory. Hlavním důvodem pro instalaci synchronních generátorů byla možnost provozu elektrárny nezávisle na provozu napájecí sítě. Starší elektrárny byly totiž většinou elektrárnami továrními, které umožňovaly jejich provoz i v době výpadků sítě. Konstruktivně se jednotlivé synchronní stroje liší v provedení mechanickém i elektrickém. Základní konstrukční rozdíl jednotlivých strojů o stejném výkonu a napětí je v počtu synchronních otáček. U rychloběžných soustrojí parních elektráren jsou generátory řešeny s hladkým rotorem, u pomaloběžných strojů vodních elektráren se setkáváme u generátorů s rotory s vyniklými póly [6].



Obr. 42 – Ukázka synchronního stroje [6]

Vytvoření dynamického modelu asynchronního stroje

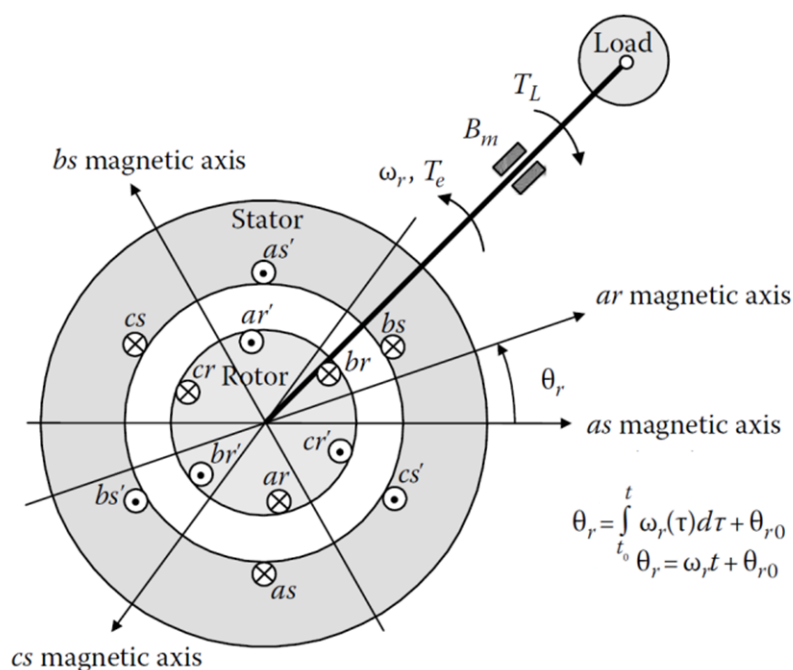
Asynchronní motory, zejména motory s kotvou nakrátko, jsou po mnoho let nejznámějšími motory. A to především kvůli jejich konstrukční jednoduchosti, nízké ceně, vysoké spolehlivosti a účinnosti.

Sestrojit matematický model asynchronního stroje není jednoduché, někteří vědci využívají k popisu tohoto stroje převod do osy d a q . Přesnější model lze však odvodit pomocí os α , β , γ . Níže uvedený model využívá odvození stroje pomocí os α , β , γ .

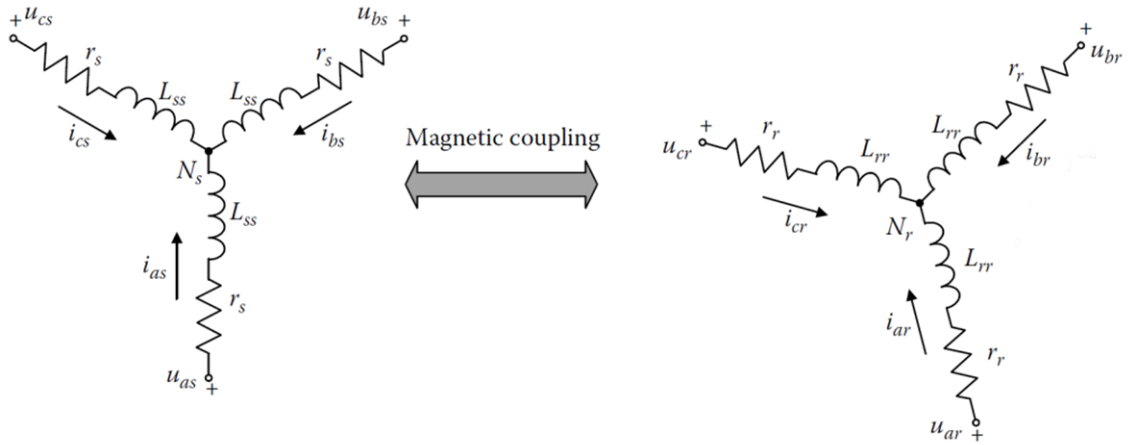
Matematický model asynchronního stroje

Vzhledem k návrhu považujeme asynchronní stroj (ASM) jako nelineární systém s řadou parametrů. Pokusili jsme se najít systém diferenciálních rovnic, který by dostatečně a přesně popsal vlastnosti stroje. Když navrhujeme matematický model, používáme řadu předpokladů, které zjednodušují sestavení matematického modelu. Zejména následující předpoklady:

- Statorová a rotorová vinutí jsou třífázová, cívky fází jsou rozloženy symetricky podél vzduchových mezer.
- Třífázová vinutí statoru a rotoru jsou připojena do hvězdy.
- Magnetická indukce podél vzduchové mezery je ideálního sinusového průběhu.
- Magnetický obvod má lineární charakteristiku.
- Odpory vinutí jsou konstantní.
- Ztráty v magnetických obvodech jsou nulové [13], [P6].



Obr. 43 – Popis třífázového symetrického indukčního stroje [24]



Obr. 44 – Zjednodušený model statorového a rotorového vinutí třífázového indukčního stroje [24], [P7]

Dle Obr. 44 – **Zjednodušený model statorového a rotorového vinutí třífázového indukčního stroje [24]** je možné stanovit vzájemné vazby magnetických toků mezi statorovým a rotorovým vinutím:

$$\begin{aligned}
 \psi_{as} &= L_{asas} \cdot i_{as} + L_{asbs} \cdot i_{bs} + L_{ascs} \cdot i_{cs} + L_{asar} \cdot i_{ar} + L_{asbr} \cdot i_{br} + L_{ascr} \cdot i_{cr} \\
 \psi_{bs} &= L_{bsas} \cdot i_{as} + L_{bsbs} \cdot i_{bs} + L_{bscs} \cdot i_{cs} + L_{bsar} \cdot i_{ar} + L_{bsbr} \cdot i_{br} + L_{bscr} \cdot i_{cr} \\
 \psi_{cs} &= L_{csas} \cdot i_{as} + L_{csbs} \cdot i_{bs} + L_{cscs} \cdot i_{cs} + L_{csar} \cdot i_{ar} + L_{csbr} \cdot i_{br} + L_{cscr} \cdot i_{cr} \\
 \psi_{ar} &= L_{aras} \cdot i_{as} + L_{arbs} \cdot i_{bs} + L_{arcs} \cdot i_{cs} + L_{arar} \cdot i_{ar} + L_{arbr} \cdot i_{br} + L_{arcr} \cdot i_{cr} \\
 \psi_{br} &= L_{bras} \cdot i_{as} + L_{brbs} \cdot i_{bs} + L_{brcs} \cdot i_{cs} + L_{brar} \cdot i_{ar} + L_{brbr} \cdot i_{br} + L_{brcr} \cdot i_{cr} \\
 \psi_{cr} &= L_{cras} \cdot i_{as} + L_{crbs} \cdot i_{bs} + L_{crCs} \cdot i_{cs} + L_{crar} \cdot i_{ar} + L_{crbr} \cdot i_{br} + L_{crcr} \cdot i_{cr}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Kde $L_{asas}, L_{bsbs}, L_{csCs}, L_{arar}, L_{brbr}, L_{crcr}$ jsou vlastní statorové a rotorové indukčnosti, dále jsou zde využity vzájemné indukčnosti mezi statorovým a rotorovým vinutím: $L_{asar}, L_{asbr}, L_{ascr}, \dots$ [24].

Vzájemné indukčnosti mezi rotorovým a statorovým vinutím jsou periodické funkce úhlového posunu θ_r , perioda je zde 2π . Předpokládejme, že vzájemné indukčnosti jsou periodické sinusové funkce popsané zde:

$$\begin{aligned}
 L_{asar} &= L_{aras} = L_{sr} \cdot \cos(\theta_r), \quad L_{asbr} = L_{bras} = L_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right), \\
 L_{ascr} &= L_{cras} = L_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right), \\
 L_{bsar} &= L_{arbs} = L_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right), \quad L_{bsbr} = L_{brbs} = L_{sr} \cdot \cos(\theta_r), \\
 L_{bscr} &= L_{crbs} = L_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right), \\
 L_{csar} &= L_{arcs} = L_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right), \quad L_{csbr} = L_{brcs} = L_{sr} \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right), \\
 L_{cscr} &= L_{crcs} = L_{sr} \cdot \cos(\theta_r), \quad L_{sr} = \frac{N_s \cdot N_r}{R_m}, \quad L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} \cdot L_{sr}, \quad [24].
 \end{aligned} \tag{5}$$

Matice vzájemných indukčností statoru a rotoru jsou:

$$L'_{sr}(\theta_r) = \frac{N_s}{N_r} \cdot L_{sr}(\theta_r) = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Matice vzájemné indukčnosti rotoru a statoru jsou:

$$L'^T_{sr}(\theta_r) = \frac{N_s}{N_r} \cdot L^T_{sr}(\theta_r) = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Pro sestavení rovnic výpočtu statorového a rotorového napětí je nutné stanovit matice tokových vazeb:

$$\begin{bmatrix} \psi_{abcs} \\ \psi'_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L'_{sr}(\theta_r) \\ L'^T_{sr}(\theta_r) & L'_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i'_{abcr} \end{bmatrix} \quad (8)$$

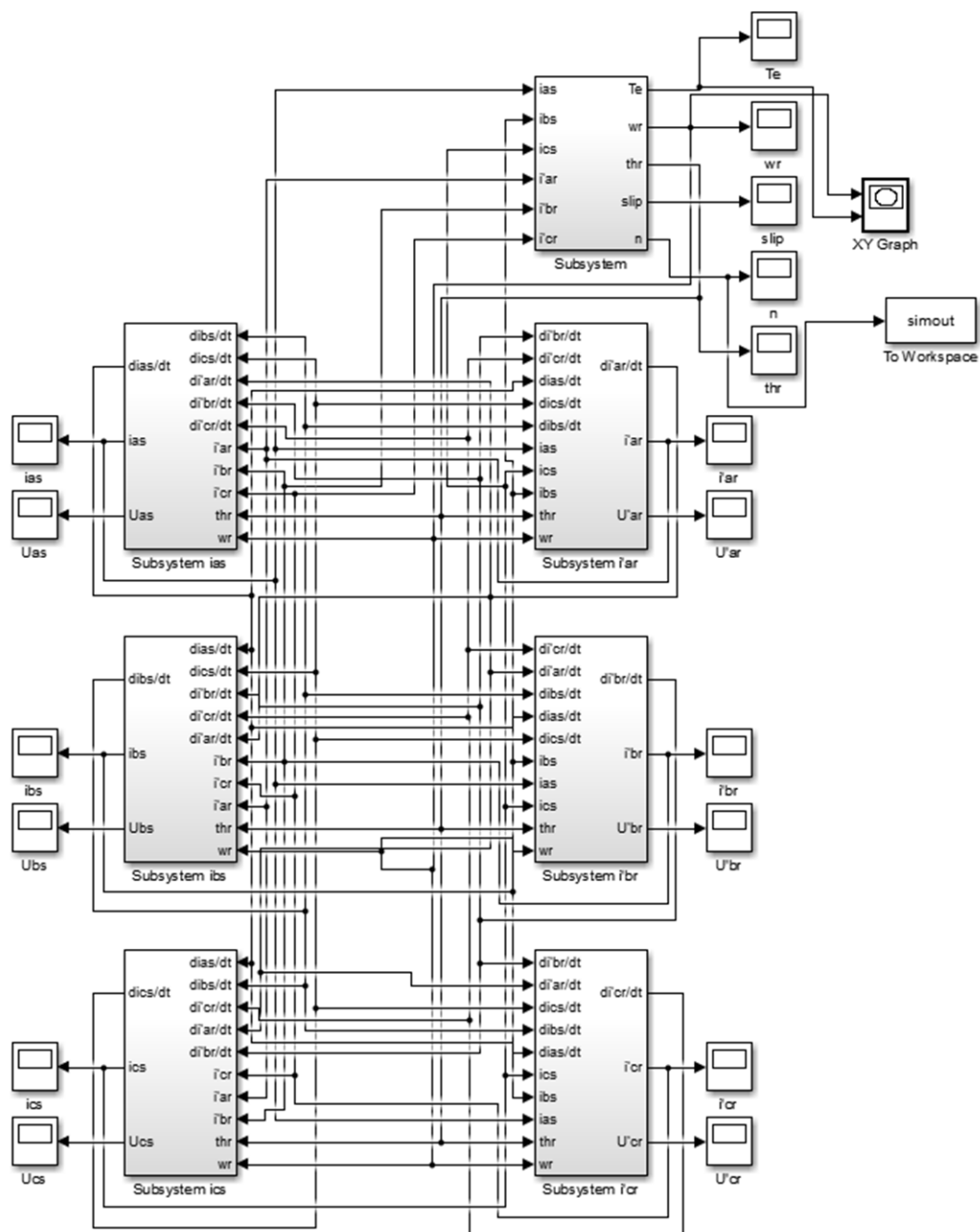
Rovnice pro výpočet statorového a rotorového napětí lze poté definovat:

$$\begin{aligned} \text{Statorové napětí - } u_{abcs} &= r_s \cdot i_{abcs} + \frac{d\psi_{abcs}}{dt} \\ \text{Rotorové napětí - } u'_{abcr} &= r'_r \cdot i'_{abcr} + \frac{d\psi'_{abcr}}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

Vytvoření simulačního modelu třífázového asynchronního stroje v MATLAB Simulink

Dynamický model je vytvořen užitím nadstavby pro simulaci a modelování dynamických systému Simulink interaktivního programového prostředí MATLAB.

Pro vytvoření dynamického modelu jsem využil výše popsané diferenciální rovnice. Bylo již také popsáno, že se jedná o diferenciální rovnice popisující asynchronní stroj, pokud se zadají parametry rotorového napětí $u'_{abcr} = 0$, jde o stroj s klecí nakrátko.



Obr. 45 – Výsledný dynamický model asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Základní prvky subsystémů výsledného dynamického modelu jsou uvedeny v Příloha B, Příloha C a Příloha D.

Získání parametrů popisující reálný stroj

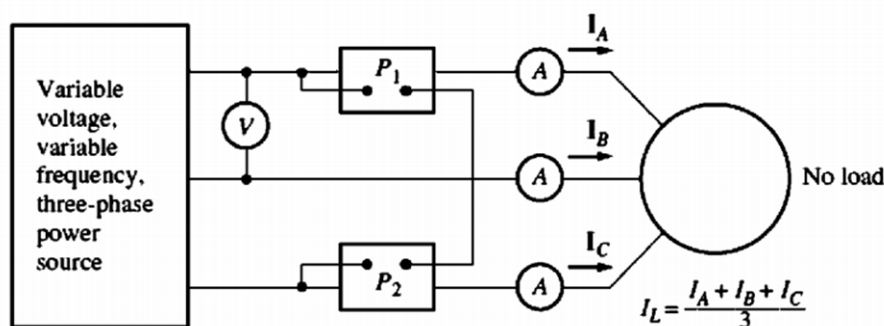
K porovnání jsem vybral třífázový asynchronní motor značky Siemens, jedná se o typ: 1LE10021AB422AB0 s parametry:

Tab. 8 – Štítkové parametry asynchronního motoru Siemens 1LE10021AB422AB0

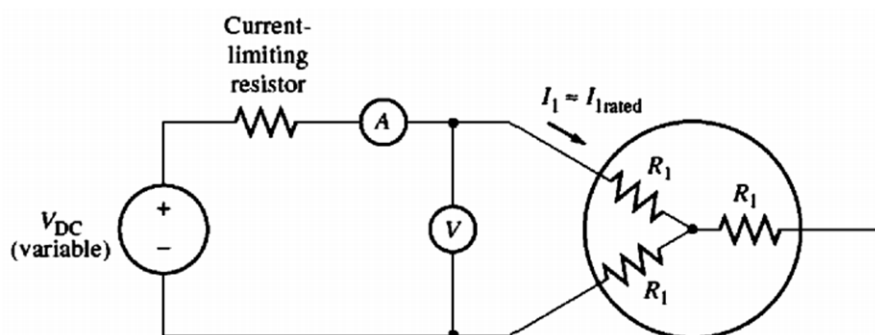
Napětí (V)/ zapojení vinutí	Frekvence (Hz)	Proud (A)	Příkon (kW)	Účinník (-)	Nominální účinnost (%)	Jm. otáčky (1/min.)
230 / Δ	50	8,6	2,2	0,81	79,7	1425
400 / Y	50	4,9	2,2	0,81	79,7	1425
460 / Y	60	4,7	2,55	0,82	83,0	1720

Pro získání potřebných vstupních parametrů pro dynamický model bylo nutné získat data reálného stroje, k získání parametrů je nutné tyto testy:

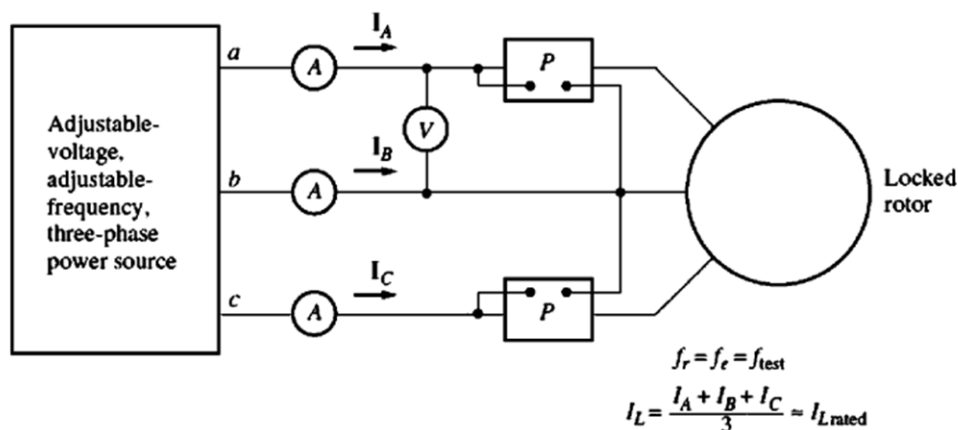
- Test nezatíženého motoru
- DC test pro získání odporu statorového vinutí
- Test motoru se zablokováným rotorem



Obr. 46 – Schéma zapojení pro test nezatíženého motoru



Obr. 47 – Schéma zapojení pro DC test pro získání odporu statorového vinutí



Obr. 48 – Schéma zapojení pro test motoru se zablokovaným rotorem [25], [26], [P2]

Po provedení tří výše popsaných testů je možné dopočítat parametry popisující tento motor.

Tab. 9 – Parametry popisující asynchronní motor Siemens 1LE10021AB422AB0

Odpor statorového o vinutí (Ω)	Odpor rotorového vinutí (Ω)	Vzájemná indukčnost (H)	Indukčnost statorového vinutí (H)	Indukčnost rotorového vinutí (H)
3,2	2,27	0,133	0,0095	0,0095

Porovnání výstupních hodnot modelu s reálným strojem

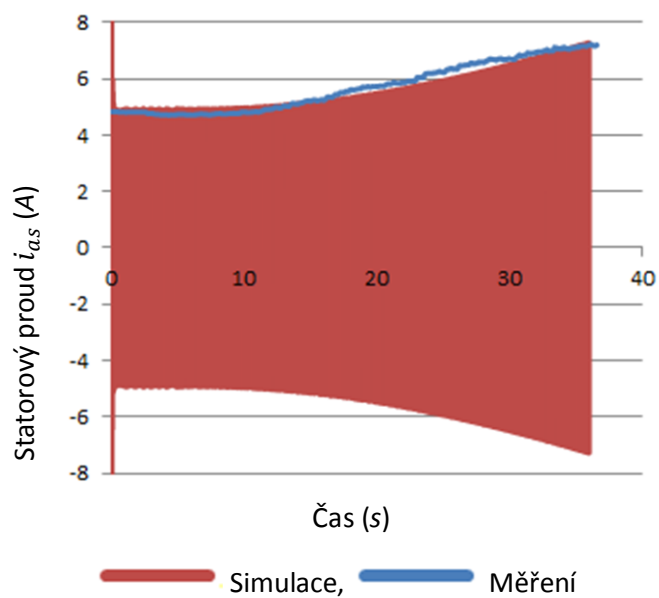
Při použití dynamického modelu asynchronního stroje lze model provozovat ve dvou režimech, motor a generátor. Režim simulace lze změnit pomocí hodnoty točivého momentu zátěže T_L , pokud je $T_L > 0$ je asynchronní stroj v motorovém režimu, pokud je $T_L < 0$ pracuje asynchronní stroj jako generátor.

Parametry asynchronního motoru v simulaci MATLAB Simulink:

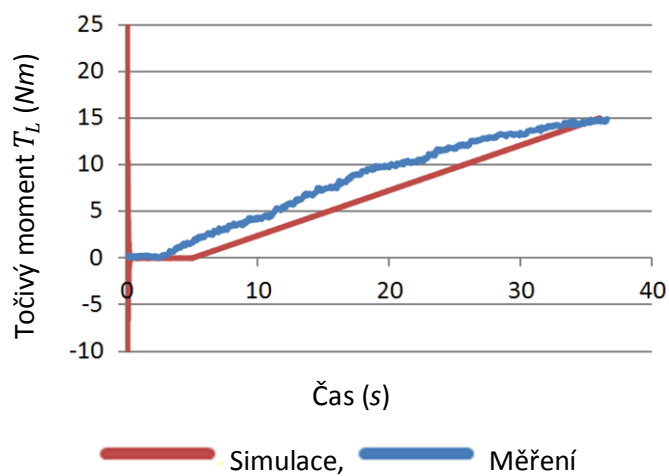
Fázové napětí statoru: $u_{abcs} = 231V$, napětí rotoru: $u'_{abcr} = 0V$ (kotva nakrátko), počet pólů: $p = 4$, odpor statorového vinutí: $R_s = 3.2\Omega$, odpor rotorového vinutí: $R_r = 2.27\Omega$, vzájemná indukčnost: $L_{ms} = 0.133H$, indukčnost statorového vinutí: $L_{ls} = 0.0095H$, indukčnost rotorového vinutí: $L'_{lr} = 0.0095H$, magnetická indukce: $B_m = 0.003T$, moment setrvačnosti: $J = 0.013kg \cdot m^2$, frekvence: $f = 50Hz$, točivý moment: $T_L = 15N \cdot m$.

Měření a simulace jsou provedeny při rozběhu stroje v čase $t = 0$ s až $t = 35$ s.

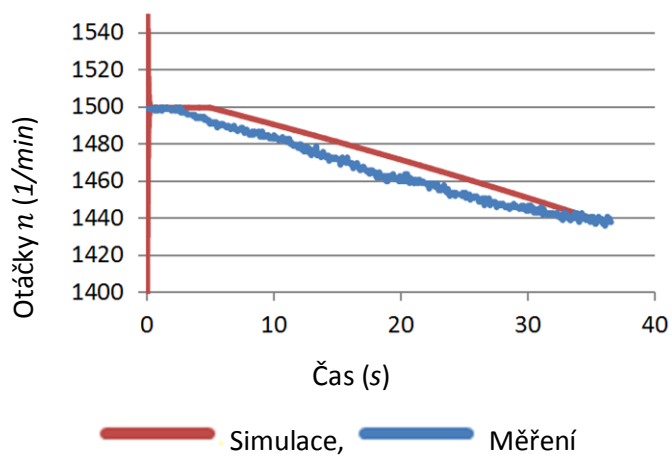
Výsledky simulace:



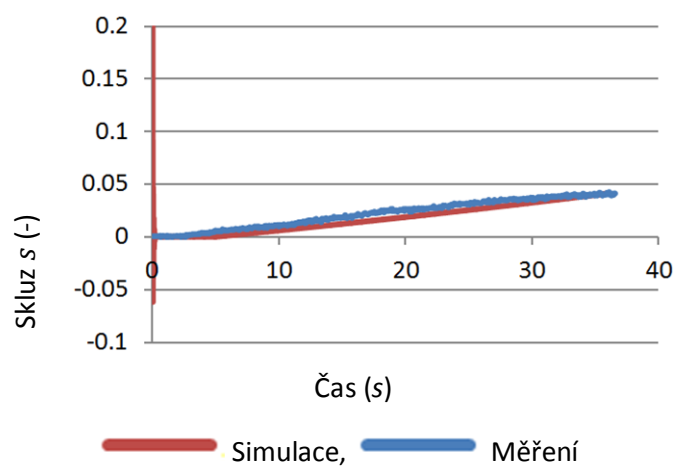
Obr. 49 – Porovnání simulace a měření statorového proudu



Obr. 50 - Porovnání simulace a měření točivého momentu



Obr. 51 - Porovnání simulace a měření otáček



Obr. 52 - Porovnání simulace a měření skluzu [P3], [P9]

Na Obr. 49 jsou vidět rozdílné hodnoty, toto je dáno znázorněním efektivní hodnoty měřeného proudu. U simulovaného proudu je znázorněná amplituda průběhu, při výběru dané časové osy se hodnoty amplitudy slévají.

Na Obr. 50, Obr. 51 a Obr. 52 jsou patrné určité rozdíly, tyto rozdíly jsou dány zjednodušujícími vstupními předpoklady pro simulační model.

10 Návrh elektrické části MVE

10.1 Regulace MVE pro snížení ztrát netěsnostmi a poruchami ve vodovodním řadu

Netěsnosti ve vodárenských distribučních sítích jsou nejčastějšími příčinami ztrát vody, jenž mohou dosahovat až 50 % v porovnání s množstvím produkované vody vodáren. Investice vynakládané na překonání těchto problémů, směřují nejčastěji k záměrům, jenž sledují jen další zvyšování produkce vody, namísto toho, aby byly podporovány programy zajišťující redukování ztrát vody.

Základním aspektem směřujícím ke změně tohoto způsobu myšlení na více ekonomický a také ekologický je zavedení do provozní praxe takových technických aplikací, jenž vychází z principu řízené regulace tlaku, resp. průtoku.

Mimořádně efektivního způsobu se dá dosáhnout využitím kombinace funkcí regulačních armatur s modulačními servopohony s PID řízením. V tomto smyslu může pracovat i MVE ve vodovodním řadu, u které je možnost řízení odběru energie pohybující se vodě. Toto lze provést např. těmito vlastnostmi vstrojení MVE:

- využití synchronního generátoru,
- využití asynchronního generátoru s kroužkovou kotvou,
- využití turbíny, u níž lze měnit natočení rotorových lopatek.

Tato problematika je popsána na případech s využitím regulačních armatur, které lze nahradit zařazením MVE do vodovodního systému na pozici zmíněných regulačních armatur.

Zatímco výrobní kapacity vody se navyšují, struktura potrubních systémů, původně navržena pro mnohem menší množství, zůstává stejná, což má za následek nárůsty tlaků.

Zejména běžně osazené armatury, jenž musí regulovat průtoky a tlaky k udržení konstantních dodávek pitné vody, nemohou plnit svoji funkci přiměřeným způsobem.

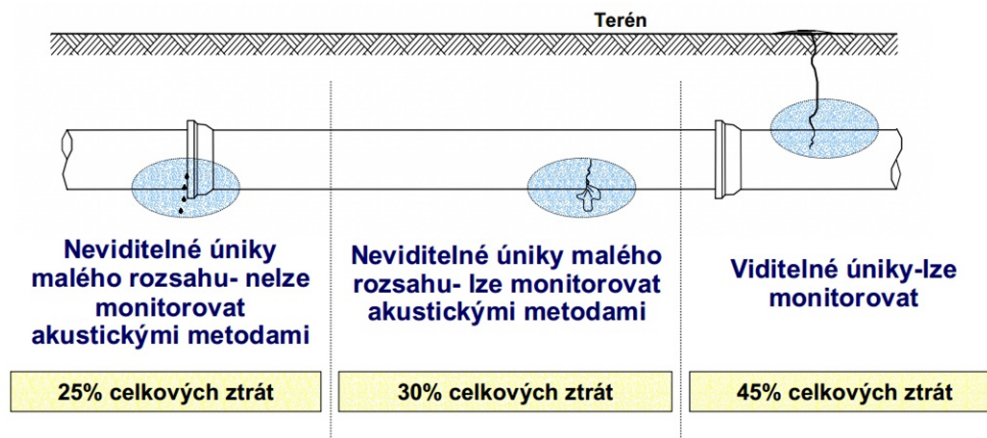
Pokud tyto armatury nemohou být řízeny dostatečně pružně, dochází v potrubních systémech k velkým tlakovým diferencím, což má za následek enormní ztráty vody vlivem netěsností na potrubním systému a praskání trubek přičemž může nakonec dojít ke kolapsu celé potrubní sítě.

Při řešení těchto stavů se dobře uplatňují regulační armatury pro řízení tlaků a průtoků.

Časté střídání úrovní provozních tlaků v potrubí pocházející z velkých rozdílů ve spotřebě vody během dne a noci, dále v závislosti na týdenním cyklu nebo střídání sezonních období jsou příčinami enormních ztrát vody netěsnostmi v potrubí a praskáním potrubí.

K omezení takovýchto provozních a poruchových stavů je nutné zajistit, aby tlaky v sítích byly drženy na nejnižší možné úrovni, jenž by zajišťovaly udržení dodávek vody dle aktuálních požadavků.

Na Obr. 53 jsou znázorněno procentuální rozložení ztrát úniky v distribučních systémech.



Obr. 53 – Úniky v distribučních systémech [14], [P1]

Výše popsané problémy vzniklé úniky vody z vodovodních sítí při nadměrných tlacích lze řešit těmito způsoby:

Skoková regulace tlaku v čase

Velmi efektivní redukce ztrát a výskytu poruchových stavů potrubí je možné dosáhnout vyřešením regulace tlaku jako mimořádně ekonomické a rychlé opatření.

Regulační ventil namontovaný přímo do přívodního potrubí může regulovat tlak v těch časových periodách, tj. především v nočních hodinách, kdy nároky na spotřebu vody jsou velmi malé a tedy tlaky v potrubí narůstají do maxima.

Díky tomuto hydraulickému efektu je pak pravděpodobnost poruch potrubí a objem ztrát netěsnostmi v potrubí v této časové periodě velmi nízká.

Vyřešení redukce tlaku tímto jednoduchým způsobem má za následek to, že tlak na začátku sítě je seškrácen na konstantní hodnotu, zatím co tlak ve vlastní síti kolísá během této periody.

Tato aplikace byla uplatněna na jednom potrubním distribučním systému s celkovou délkou cca 83 km kde je 9000 vodovodních přípojek. Dvouleté zkušenosti tohoto projektu ukázaly, že prokazatelné ztráty poklesly o 30 % a poruchovost na potrubním systému poklesla o 50 %.

Redukce tlaku modulací průtoku

Ještě více ztrátových množství vody může být ušetřeno a poškozených potrubí ochráněno, pokud se podaří dosáhnout toho, že tlak v potrubí pružně kopíruje křivku spotřeby vody, během celého denního cyklu, resp. týdně nebo i dle ročních sezón.

Průtokoměr v přívodním potrubí rozeznává aktuální spotřebu v síti. Tyto hodnoty se zasílají do počítače, který vyhodnocuje provozní křivku, která je pro daný potrubní systém ukládána do paměti. Křivky spotřeby pak udávají, jaké minimální úrovně tlaku jsou nezbytné pro udržení příslušného požadovaného průtokového množství. Software bude nyní řídit tlak pomocí regulačního ventilu a průtokového snímače v průběhu celého dne.

Zatímco skoková regulace tlaku, popsána v předešlém typu řešení, udržuje konstantní hodnotu tlaku během fixně definované denní časové periody, bude pak tato metoda redukce tlaku pomocí modulace průtoku řídit tlak podle požadovaných průtokových množství během celých 24 hodin.

Úspora vodních ztrát a redukce poruchovosti potrubí bude pak odpovídajícím způsobem vyšší.

Regulace tlaku modulací tlaku

Při redukce tlaku modulací průtoku, viz předchozí popis regulace, zůstává tlak v hlavním přívodu stabilní, zatímco ve vlastní síti dochází k mírným pulsacím, podle aktuálních průtokových množství vlivem nárazových spotřeb.

S následujícím systémem regulace je možné udržovat tlak na ještě poněkud nižší úrovni. Při systému redukce tlaku tlakovou modulací je tlak měřen přímo v síti na kritických místech, přičemž signalizace je vedena bezdrátově do tlakové regulační stanice.

Tento systém, sestávající z regulačního ventilu a softwarové komunikace ovládá tlak přímo v síti, bez jakékoliv oscilační hystereze potrubního systému. Úspora vody a poruchy na potrubním systému, mohou být tak redukovány na absolutní minimum.

Tento systém řízené redukce tlaku je možné považovat za nejdokonalejší a nejúspornější. Praktické zkušenosti ukazují na téměř nulové ztráty vlivem stabilizace tlaku. Podobná situace se týká výskytu poruchových stavů na potrubí [14].

Je možné uvést konkrétní příklad úspory při inteligentní regulaci tlakových poměrů ve vodovodním řádu.

Konkrétně se jedná o město Bardejov, které se nachází na území Slovenské republiky.

Bylo zde využito nejúčinnější regulace tlaku modulací tlaku, tak jako je uvedeno v poslední části řešení problému s úniky vody.

V tomto případě se provedenou úpravou a regulací tlaku dosáhlo snížení odběrů vody ve vodovodním systému z původní hodnoty 2286,5 m³/den na hodnotu 2024,7 m³/den, je zde tedy úspora vody o objemu 261,8 m³/den. Tyto úspory byly měřeny orientačně jen v desetidenních intervalech.

Dlouhodobá úspora v ročním měřeném intervalu byla 74 248 m³.

Z hlediska snížení poruch na regulovaném vodovodním systému jsou zaznamenány také velice uspokojivé výsledky. Před zřízením regulace tlaku modulací tlaku ve vodovodní síti bylo zaznamenáno 77 poruch v ročním intervalu. Po provedení úpravy vodovodní sítě, kdy bylo provedeno výše popsání řízení, tyto poruchy klesly téměř o polovinu, v monitorovaném ročním intervalu bylo zaznamenáno 35 poruch.

Podrobný rozbor úpravy tlakových poměrů města Bardejov je možné shlédnout v [15].

10.2 Ochrany MVE podle normy ČSN 33 3051

Norma ČSN 33 3051 „Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení“ (účinnost od 1992) definuje obecné zásady pro navrhování ochrany a jejich správnou funkci a pro daný výkon elektrického stroje určuje použité ochrany.

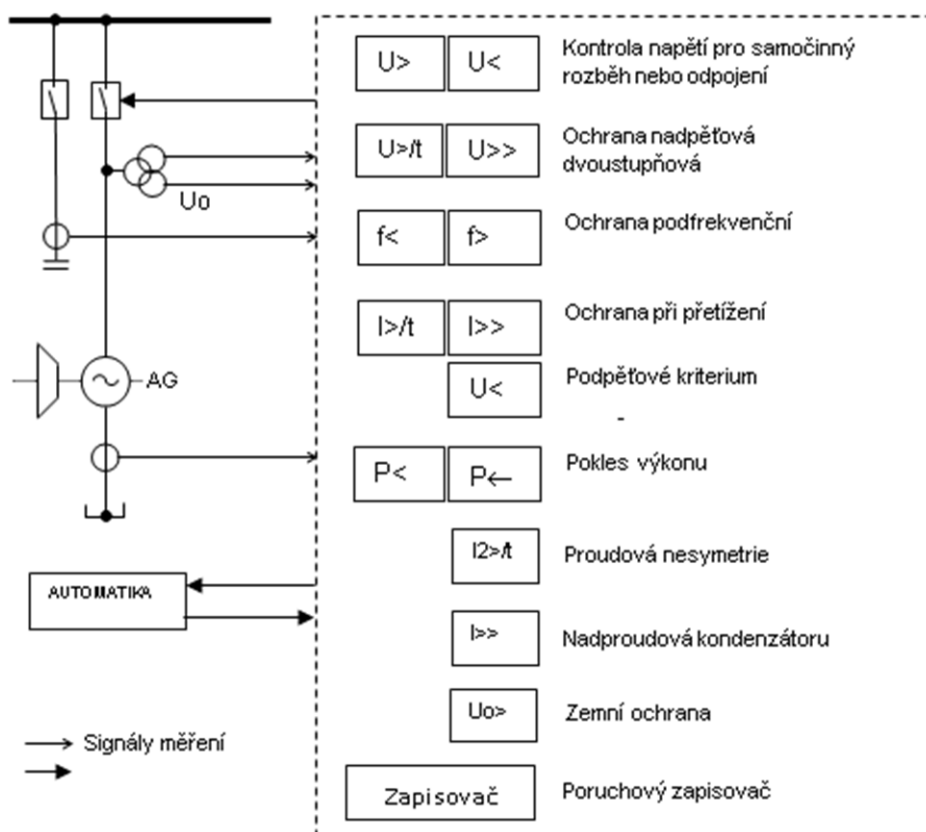
Podle této normy musí ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení plnit tyto činnosti:

- rychle a spolehlivě určit poruchu nebo překročení meze normálního provozu chráněného zařízení
- vypnout je v čase, který musí být stanoven tak, aby se zabránilo vzniku škod nebo se omezil jejich rozsah na stroji nebo zařízení a zajistila se tak ochrana osob před účinky elektrické energie

- snížit riziko požáru v důsledku tepelných účinků zkratového proudu
- zajistit, aby se porucha nerozšířila na ostatní prvky ES a neohrozila její chod a napájení spotřebitele.

Norma ČSN 33 3051 definuje pro chránění asynchronních hydroalternátorů do jmenovitého výkonu 2,5 MVA následující ochrany:

- 1) Nadproudová zkratová časově nezávislá – ochrana může být s odblokováním při podpětí, pro $P < 500 \text{ kW}$ lze použít jistič
- 2) Přetížení statoru
- 3) Nadpětí – kmitočtově nezávislá, u vn alternátorů dvoustupňová
- 4) Podpětí
- 5) Zpětná wattová – pouze u zařízení bez trvalé obsluhy, pro výkony nad 30 kVA
- 6) Nesouměrné zatížení – ochrana se doporučuje
- 7) Nadkmitočtová – ochrana se doporučuje
- 8) Kontrola roztočení – použije se v přečerpávacích vodních elektrárnách s asynchronním rozběhem soustrojím
- 9) Nadproudová kompenzačních kondenzátorů



Obr. 54 - Příklad systému chránění MVE s asynchronním generátorem a kompenzačním rozvaděčem [20]

Sledované poruchové senzory:

- teploměry v ložiskách
- teploměry ve vinutí
- tlakoměry oleje regulátoru a mazání turbíny
- proběhnutí turbíny
- ucpání česlic

Norma ČSN 33 3051 definuje pro chránění synchronních hydroalternátorů do jmenovitého výkonu 1,0 MVA následující ochrany:

- 1) Nadproudová zkratová časově nezávislá – ochrana může být s odblokováním při podpětí
- 2) Přetížení statoru – ochrana se doporučuje
- 3) Nadpěťová – kmitočtově nezávislá, u vn alternátorů dvoustupňová
- 4) Zpětná wattová – pouze u zařízení bez trvalé obsluhy, pro jmenovité výkony nad 30 kVA

Norma ČSN 33 30 51 definuje pro chránění synchronních hydroalternátorů se jmenovitým výkonem od 1,0 MVA do výkonu 2,5 MVA následující ochrany:

- 1) Nadproudová zkratová časově nezávislá – ochrana je s odblokováním při podpětí
- 2) Přetížení statoru
- 3) Rozdílová
- 4) Nadpěťová – kmitočtově nezávislá, u vn alternátorů dvoustupňová
- 5) Zemní statoru – ochrana se doporučuje
- 6) Zemní rotoru
- 7) Zpětná wattová – pouze u zařízení bez trvalé obsluhy

Norma ČSN 33 30 51 definuje pro chránění synchronních hydroalternátorů se jmenovitým výkonem od 2,5 MVA do výkonu 5,0 MVA následující ochrany:

- 1) Nadproudová zkratová časově nezávislá – ochrana je s odblokováním při podpětí
- 2) Přetížení statoru
- 3) Rozdílová
- 4) Nadpěťová – kmitočtově nezávislá, u vn alternátorů dvoustupňová
- 5) Podpěťová – ochrana se použije ve vodních elektrárnách s motorickým chodem hydroalternátoru (kompenzační a čerpadlový provoz). Pro ochranu při ztrátě příkonu se doporučuje použít kmitočtovou ochranu působící při poklesu kmitočtu
- 6) Zemní statoru – ochrana se doporučuje
- 7) Zemní rotoru
- 8) Zpětná wattová – pouze u zařízení bez trvalé obsluhy
- 9) Při ztrátě příkonu
- 10) Zkratová při rozběhu

- 11) Kontrola synchronismu během rozběhu – ochrana se doporučuje, použije se v přečerpávacích vodních elektrárnách se synchronním rozběhem soustrojím
- 12) Kontrola roztočení – použije se v přečerpávajících vodních elektrárnách s asynchronním rozběhem soustrojí
- 13) Kontrola oteplení během rozběhu - použije se v přečerpávajících vodních elektrárnách s asynchronním rozběhem soustrojí
- 14) Při zemním spojení vývodu vn (podle zapojení bloku) – ochrana se doporučuje

Norma ČSN 33 30 51 definuje pro chránění synchronních hydroalternátorů se jmenovitým výkonem od 5,0 MVA do výkonu 10,0 MVA následující ochrany:

- 1) Nadproudová zkratová časově nezávislá – ochrana je s odblokováním při podpětí
- 2) Přetížení statoru
- 3) Rozdílová
- 4) Nadpětí – kmitočtově nezávislá, u vn alternátorů dvoustupňová
- 5) Podpětí – ochrana se použije ve vodních elektrárnách s motorickým chodem hydroalternátoru (kompenzační a čerpadlový provoz). Pro ochranu při ztrátě příkonu se doporučuje použít kmitočtovou ochranu působící při poklesu kmitočtu
- 6) Zemní statoru – ochrana se doporučuje
- 7) Zemní rotoru
- 8) Zpětná wattová – pouze u zařízení bez trvalé obsluhy
- 9) Nesouměrné zatížení – ochrana se doporučuje
- 10) Při ztrátě příkonu
- 11) Zkratová při rozběhu
- 12) Kontrola synchronismu během rozběhu – ochrana se doporučuje, použije se v přečerpávacích vodních elektrárnách se synchronním rozběhem soustrojím
- 13) Kontrola roztočení – použije se v přečerpávajících vodních elektrárnách s asynchronním rozběhem soustrojí
- 14) Kontrola oteplení během rozběhu - použije se v přečerpávajících vodních elektrárnách s asynchronním rozběhem soustrojí
- 15) Při zemním spojení vývodu vn (podle zapojení bloku) – ochrana se doporučuje [18]

10.3 Ochrany MVE podle pravidel provozovatele

Potřebné elektrické ochrany MVE jsou definovány také pravidly provozovatele distribuční soustavy příslušejícího k lokalitě budované MVE. Například směrnice „Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy (aktuální od června 2010)“, kterými se řídí ČEZ distribuce a „Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy (aktuální od listopadu 2011)“, kterými se řídí E.ON distribuce, výše jmenovaná pravidla definují požadavky na chránění výroben (MVE včetně) následovně:

Řešení ochran uživatele na hranici vlastnictví, včetně typů zařízení a nastavení ochran i přenos informací o působení ochran musí odpovídat standardům provozovatele distribuční soustavy (dále jen PDS), které PDS specifikoval během vyřizování žádosti o připojení.

Zejména:

- maximální doba vypnutí poruchy (od počátku poruchového proudu až do zhašení oblouku) musí být v rozmezí hodnot stanovených PDS a v souladu s limity zkratové odolnosti zařízení, přijatými pro distribuční soustavy
- uživatel nesmí omezit činnost automatik distribuční soustavy (opětné zapínání, regulace napětí apod.) a tím snížit kvalitu dodávané elektřiny
- při připojení k distribuční soustavě by si měl uživatel být vědom toho, že v distribuční soustavě mohou být používány prvky automatického nebo sekvenčního spínání. PDS podá na požádání podrobné informace o prvcích automatického nebo sekvenčního spínání, aby uživatel mohl tyto informace zohlednit v návrhu své soustavy, včetně řešení ochran.
- uživatel by si měl být zároveň vědom toho, že při napájení ze sítě vn s kompenzací zemních kapacitních proudů může v této síti nesymetrie fázových napětí vlivem zemního spojení trvat až několik hodin a že řešení ochran v některých distribučních soustavách, např. ve venkovských oblastech, může u některých typů poruch způsobit odpojení pouze jedné fáze třífázové soustavy.

Nastavení ochran podle pravidel provozovatele ČEZ**Neselektivně vypínané výrobní jednotky**

Je zapotřebí zajistit ochrany s následujícími funkcemi:

Tab. 10 - Nastavení ochran neselektivně vypínaných jednotek, ČEZ [16]

Funkce	rozsah nastavení	Příklad nastavení	Časové zpoždění	Příklad nastavení
Podpětí 1.stupeň $U_{<}$	$0.70 U_n$ až $1.0 U_n$	$80 \% U_n$	$t_{U_{<}}$	0,5 s
Podpětí 2.stupeň $U_{<<}$	$0.70 U_n$ až $1.0 U_n$	$70 \% U_n$	$t_{U_{<<}}$	0,1 s
Přepětí 1.stupeň $U_{>}$	$1.0 U_n$ až $1.2 U_n$	$110 \% U_n$	$t_{U_{>}}$	0,5 s
Přepětí 2.stupeň $U_{>>}$	$1.0 U_n$ až $1.2 U_n$	$120 \% U_n$	$t_{U_{>>}}$	0,1 s
Podfrekvence 1.stupeň $f_{<}$	48 Hz až 50 Hz	49,8 Hz	$t_{f_{<}}$	0,5 s
Podfrekvence 2.stupeň $f_{<<}$	48 Hz až 50 Hz	49,5 Hz	$t_{f_{<<}}$	0,1 s
Nadfrekvence $f_{>}$	50 Hz až 52 Hz.	50,2 Hz	$t_{f_{>}}$	0,5 s

Po dohodě s PDS lze ustoupit od 2. stupně uvedených ochran.

Pro ochrany zdrojů s fázovými proudy do 16 A provozovaných paralelně s distribuční sítí nn, na které se vztahuje ČSN EN 50438, platí:

Tab. 11 - Nastavení ochran neselektivně vypínaných jednotek s f. proudy do 16 A, ČEZ [16]

Parametr	Maximální vypínací čas [s]	Maximální nastavení pro vypnutí
nadpětí	0,2	230 V + 15 %
podpětí	0,2	230 V - 15 %
nadfrekvence	0,2	50,5 Hz
podfrekvence	0,2	49,5 Hz

V některých případech může být s ohledem na síťové poměry třeba jiné nastavení ochran. Proto je jejich nastavení vždy nutné odsouhlasit s PDS.

Podpětová a nadpětová ochrana musí být trojfázová (v sítích s izolovaným uzlem vn nebo s kompenzací zemních kapacitních proudů může být v dohodě s PDS použita přepětová ochrana jednofázová, připojená na sdružené napětí).

Podfrekvenční a nadfrekvenční ochrana může být jednofázová.

Selektivně vypínané výrobní jednotky

Jako základní nastavení ochran rozpadového místa jsou doporučeny hodnoty v následující tabulce:

Tab. 12 - Nastavení ochran rozpadového místa, ČEZ [16]

Funkce	Rozsah nastavení	Doporučené nastavení ochrany	
Přepětí 2. stupeň $U >>$	1,00 – 1,30 U_n	1,05 - 1,15 U_n ¹⁾	nezpožděně
Přepětí 1. stupeň $U >$	1,00 – 1,30 U_n	1,02 - 1,05 U_n ¹⁾	≤ 60 s ¹⁾
Podpětí 1. stupeň $U <$	0,10 – 1,00 U_n	0,7 U_n	0 – 2,7 s ¹⁾
Podpětí 2. stupeň $U <<$	0,10 – 1,00 U_n	0,3 U_n (0,45 U_n) ²⁾	$\geq 0,15$ s
nadfrekvence $f >$	50 – 52 Hz	51,5 Hz (50,5 Hz) ³⁾	≤ 100 ms
podfrekvence $f <$	47,5 – 50 Hz	47,5 Hz ⁴⁾	≤ 100 ms
Jalový výkon/ podpětí ($Q \bullet$ & $U <$)	0,70 – 1,00 U_n	0,85 U_n	$t_1 = 0,5$ s

- *Nastavení ochran a jejich časová zpoždění udává PDS v závislosti na koncepci chránění, způsobu provozu (OZ), přípojném bodě (přípojnice transformovny nebo v síti) a výkonu výrobní jednotky.*
- *Tento napěťový stupeň vyvolá rychlé odpojení od sítě při blízkých zkratech. Nastavení 0,3 U_n se volí pro zdroje připojené do sítě 110 kV a napětí měřené na straně vn (odpovídá mu cca 15 % U_n v přípojném bodě. Nastavení 0,45 U_n se volí pro zdroje připojené do sítě vn a při měření napětí na straně nižšího napětí.*
- *Nastavení 50,5 Hz platí, když se výrobní nepodílí na kmitočtově závislém snižování činného výkonu*
- *Toto nastavení je závislé na výkonu výroby a kmitočtově závislém přizpůsobení výkonu.*

Nastavení se vztahují ke sdruženému napětí v sítích vn a 110 kV. Časy vypnutí sestávají ze součtu časového nastavení a vlastních časů spínačů a ochran [16].

Nastavení ochran podle pravidel provozovatele E.ON**Neselektivně vypínané výrobní jednotky**

Je zapotřebí zajistit ochrany s následujícími funkcemi:

Tab. 13 - Nastavení ochran neselektivně vypínaných jednotek, E.ON [17]

Funkce	rozsah nastavení	Standardní nastavení	Časové zpoždění	Standardní nastavení
Podpětí 1.stupeň $U_{<}$	$0.70 U_n$ až $1.0 U_n$	$90 \% U_n$	$t_{U_{<}}$	0,5 s
Podpětí 2.stupeň $U_{<<}$	$0.70 U_n$ až $1.0 U_n$	$80 \% U_n$	$t_{U_{<<}}$	0,1 s
Nadpětí 1.stupeň $U_{>}$	$1.0 U_n$ až $1.2 U_n$	$110 \% U_n$	$t_{U_{>}}$	0,5 s
Nadpětí 2.stupeň $U_{>>}$	$1.0 U_n$ až $1.2 U_n$	$120 \% U_n$	$t_{U_{>>}}$	0,1 s
Podfrekvence 1.stupeň $f_{<}$	48 Hz až 50 Hz	48 Hz	$t_{f_{<}}$	0,5 s
Podfrekvence 2.stupeň $f_{<<}$	48 Hz až 50 Hz	47,5 Hz	$t_{f_{<<}}$	0,1 s
Nadfrekvence $f_{>}$	50 Hz až 52 Hz.	50,2 Hz	$t_{f_{>}}$	0,5 s

Po dohodě s PDS lze ustoupit od 2. stupně uvedených ochran.

Pro ochrany zdrojů s fázovými proudy do 16 A provozovaných paralelně s distribuční sítí nn, na které se vztahuje ČSN EN 50438, platí:

Tab. 14 - Nastavení ochran neselektivně vypínaných jednotek s f. proudy do 16 A, E.ON [17]

Parametr	Maximální vypínací čas [s]	Nastavení pro vypnutí
nadpětí	0,2	230 V + 15-%
podpětí	0,2	230 V - 15-%
nadfrekvence	0,5	52Hz
podfrekvence	0,5	47,5 Hz

V některých případech může být s ohledem na síťové poměry třeba jiné nastavení ochran. Proto je jejich nastavení vždy nutné odsouhlasit s PDS.

Podpětňová a nadpětňová ochrana musí být trojfázová (v sítích s izolovaným uzlem vn nebo s kompenzací zemních kapacitních proudů může být v dohodě s PDS použita přepětňová ochrana jednofázová, připojená na sdružené napětí).

Výjimku tvoří jednofázové a dvoufázové zdroje do výkonu 4,6 kVA/fázi.

Selektivně vypínané výrobní jednotky

Jako základní nastavení ochran rozpadového místa jsou doporučeny hodnoty v následující tabulce:

Tab. 15 - Nastavení ochran rozpadového místa [17]

Funkce	Rozsah nastavení	Doporučené nastavení ochrany	
Nadpětí 2. stupeň $U \gg$	1,00 – 1,30 U_n	1,2 U_n ¹⁾	nezpožděně
Nadpětí 1. stupeň $U >$	1,00 – 1,30 U_n	1,15 U_n ¹⁾	$\leq 60 \text{ s}$ ¹⁾
Podpětí 1. stupeň $U <$	0,10 – 1,00 U_n	0,7 U_n	0 – 2,7 s ¹⁾
Podpětí 2. stupeň $U \ll$	0,10 – 1,00 U_n	0,3 U_n (0,45 U_n) ²⁾	$\geq 0,15 \text{ s}$
nadfrekvence $f >$	50 – 52 Hz	51,5 Hz (50,5 Hz) ³⁾	$\leq 100 \text{ ms}$
podfrekvence $f <$	47,5 – 50 Hz	47,5 Hz ⁴⁾	$\leq 100 \text{ ms}$
Jalový výkon/ podpětí ($Q \bullet$ & $U <$)	0,70 – 1,00 U_n	0,85 U_n	$t_1 = 0,5 \text{ s}$

- Nastavení ochran a jejich časová zpoždění udává PDS v závislosti na koncepci chránění, způsobu provozu (OZ), přípojném bodě (přípojnice transformovny nebo v síti) a výkonu výrobní jednotky.
- Tento napěťový stupeň vyvolá rychlé odpojení od sítě při blízkých zkratech. Nastavení 0,3 U_n se volí pro zdroje připojené do sítí 110 kV a napětí měřené na straně vn (odpovídá mu cca 15 % U_n v přípojném bodě. Nastavení 0,45 U_n se volí pro zdroje připojené do sítí vn a při měření napětí na straně nižšího napětí.
- Nastavení 50,5 Hz platí, když se výrobní nepodílí na kmitočtově závislém snižování činného výkonu
- Toto nastavení je závislé na výkonu výrobní a kmitočtově závislém přizpůsobení výkonu.

Nastavení se vztahují ke sdruženému napětí v sítích vn a 110 kV. Časy vypnutí sestávají ze součtu časového nastavení a vlastních časů spínačů a ochran [17].

10.4 Pomocná aplikace pro výběr vhodného chránění MVE

Tak jak bylo uvedeno v kap. 9.1, tato aplikace obsahuje více pomocných nástrojů, které jsou nápomocny. Jsou zde uvedeny základní pravidla provozovatelů ČEZ a E.ON, ale také podstatné informace pro nastavení ochran zmíněných provozovatelů distribuční sítě.

Mimo tuto vlastnost aplikace obsahuje i doporučení ochran dle ČSN 33 3051, toto doporučení je svázáno s vybraným typem generátoru využitého v MVE a vypočteným výkonem generátoru, odhad

vypočteného výkonu generátoru je vidět na Obr. 38. Zobrazení náhledu na funkci doporučení ochran dle zvoleného typu generátoru a vypočteného výkonu generátoru je na Obr. 55. V tomto případě jsou zde zobrazena doporučení, která se týkají synchronního generátoru o výkonu přibližně 386,5 kW.

Doporučené ochrany dle ČSN 33 3051:

Výběr generátoru:

Synchronní generátor	▼
Asynchronní generátor	
Synchronní generátor	

Doporučené ochrany pro zvolenou konfiguraci

- 1) Nadproudová zkratová časově nezávislá – ochrana může být s odblokováním při podpětí
- 2) Přetížení statoru – ochrana se doporučuje
- 3) Nadpěťová – kmitočtově nezávislá, u vn alternátorů dvoustupňová
- 4) Zpětná wattová – pouze u zařízení bez trvalé obsluhy, pro jmenovité výkony nad 30 kVA

Obr. 55 – Doporučení ochran pro MVE pomocnou aplikací [P5]

Závěr

Problematika umístění MVE do vodárenského systému je dosud neprobádaná, přitom zde existuje potenciál využít nevyužitou energii vody. Tato problematika se bude dále jistě rozvíjet, protože využití pozemních vodních toků je se stálými nedostatky vody problematické. Samotné umístění MVE do vodárenských systémů má mnoho nesporných pozitiv.

V úvodu práce jsem se věnoval teoretické problematice. Mezi prvními kapitolami je popsán vývoj podílu zdrojů elektrické energie na celkové výrobě v České republice. Mezi tyto zdroje patří samozřejmě i obnovitelné zdroje, mezi které patří vodní elektrárny. V roce 2019 klesla celková výroba elektrické energie o 1 TWh, což představuje pokles o 1,1 %. Pozitivní je navýšení výroby elektrické energie vodními elektrárnami, v roce 2019 vzrostla tato výroba o 0,4 TWh (23,4 %). Je pravděpodobné, že se tento podíl výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů bude nadále zvyšovat. Při výstavbě MVE, i samotné výrobě elektrické energie MVE je možné čerpat bonusy, které dále podporují rozvoj v této oblasti. V práci jsem se zmínil také o základech hydroenergetiky, mezi tyto základy patří především rozdělení turbín a zmínka o základních typech turbín, využívaných v MVE. V následující kapitole práce se zmiňuji o základech vodárenství, díky pochopení provozu vodárenských objektů je možné správně umístit MVE do vodárenských objektů.

Stěžejní obsah práce je v následujících kapitolách. Díky získaným vědomostem studiím vodárenství a vodovodních řadů jsem vytvořil doporučení pro nejvhodnější umístění MVE do vodárenského systému. Pokud toto doporučení zobecníme, můžeme vybrat vhodnou lokalitu pro umístění MVE ve vodovodním řadu v těchto místech: u paty vodojemu, před úpravnou vody na konci přivaděče surové vody, či v místech čerpací stanice. Umístění MVE ve zmíněných místech mají pozitivní vliv na vodovodní řad, mohou regulovat tlak, průtok, či úroveň hladiny. Mezi další pozitiva patří i perfektní mísení přidaných aditiv s vodou ve vodovodním řadu, této vlastnosti lze využít při umístění MVE za úpravnou vody. Zmínil jsem mnoho pozitiv působení MVE na vodovodní řad a vodu v něm. Musíme mít však na paměti, že výroba elektrické energie je v daném místě jen sekundární, prioritou zůstává vždy dodávka vody. Pro účely obtoku turbíny MVE je ve strojovně umístěn bypass, kterým je možné plně odvést vodu mimo turbínu. Vytvořenou metodiku jsem také prověřil v reálné lokalitě. V reálné lokalitě jsem vybral vhodné umístění pro MVE, umístění je na konci přivaděče vody z přehrady do úpravy vody. Hrubý spád v této lokalitě je 80 m, pro zjištění využitelného průtoku je nutné vyhodnotit provedené měření v lokalitě. Po analyzování dat hodinových průtoků v rámci jednoho roku, jsem zvolil využitelný průtok, tedy hltlost turbíny 80 l/s, tento průtok představuje využitelnost toku v 95 % zkoumaného období. Následujícím krokem je výběr vhodného typu turbíny pro MVE, pro ulehčení výběru vhodné turbíny jsem vytvořil aplikaci, která ulehčí tento výběr. Tato aplikace vyžaduje zadání jen základních parametrů, jako je spád a průtok turbínou. Po zadání zjištěných dat, je aplikací doporučený typ Peltonova turbína, tato turbína je vhodná pro vyšší spády s nižšími průtoky. Dle průtoku a spádu můžeme tuto MVE zařadit do mikro vodních elektráren. Díky jednoduchosti, ceně a dostupnosti je obvykle v MVE využít asynchronní generátor. Součástí mnou vytvořené aplikace je také doporučení pro výběr ochrany tohoto generátoru. Generátory nepřesahující výkonem stovky kilo wattů, mají svorkové výstupní napětí 400 V, proto je možné tento generátor připojit přímo do distribuční soustavy. Pro simulaci provozu asynchronního stroje jsem vytvořil dynamický model v simulačním prostředí Simulink výpočetní platformy MATLAB. Dynamický model

jsem ověřil porovnáním se skutečným motorem. Výsledky simulace a naměřených dat jsou téměř shodné.

V průběhu práce jsem využil mé vlastní nápady a vytvořené pomocné aplikace, které napomohou k zjednodušení rozhodovacích procesů při výběru zásadních prvků MVE. Vytvořil jsem metodiku pro výběr vhodného umístění MVE ve vodárenských objektech, tuto metodiku jsem ověřil v reálné lokalitě. Při postupu výběru vhodné turbíny pro MVE v reálné lokalitě jsem vyhodnotil dlouhodobá měření.

Seznam použité literatury

- [1] Ministerstvo průmyslu a obchodu: Národní akční plán České republiky pro energii z obnovitelných zdrojů, 2015 [online]. [cit. 2020-9-25]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54909/62718/649151/priloha001.pdf>.
- [2] Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v České republice: studie analyzuje současný stav a předpoklady rozvoje v dlouhodobějším horizontu. Praha: ČEZ, 2007, 181 s., ISBN 978-80-239-8823-9.
- [3] Energetický regulační úřad: Roční zpráva o provozu ES ČR 2019, 2019. [online]. [cit. 2020-9-25]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Rocni_zprava_provoz_ES_2019.pdf/debe8a88-e780-4c44-8336-a0b7bbd189bc.
- [4] Krejčí, P., Rozehnal, P., Čumpelík, R.: Evaluation of Selected Parameters of Quality of Electric Energy Distribution Network. In Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011, Ostrava:VŠB-TU Ostrava, 2011, p. 584-587, ISBN 978-80-248-2393-5.
- [5] Technologická agentura České republiky: E01 Klasifikace a typizace vodárenských systémů, Ostrava:VŠB-TU Ostrava, 2012.
- [6] Gabriel, P., Čihák, F., Kalandra, P.: Malé vodní elektrárny. Praha: ČVUT v Praze, 1998, 321 s., ISBN 80-01-01812-1.
- [7] Bednář, J.: Turbíny (malé vodní elektrárny). Blansko: Nakladatelství Marcela Bednářová, 2013, 360 s. ISBN 978-80-905437-0-6.
- [8] Broža, V.: Vodohospodářské stavby. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03175-6.
- [9] Kriš, J.: Vodárenstvo I: zásobovanie vodou. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave vo Vydavateľstve STU, 2006. ISBN 80-227-2426-2.
- [10] Holata, M., Gabriel, P.: Malé vodní elektrárny: projektování a provoz. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0828-4.
- [11] Chrástek, J.: Regulační armatury ve vodárenství – volby, návrhy, výpočty. Voda Zlín 2015, Zlín: Zlínská vodárenská, a.s., 2015. ISBN 978-80-905716-1-7.

- [12] Masný, P.: Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [13] I. Ouachtouk, S. El Hani, S. Guedira, K. Dahi, L. Sadiki, Research Related Electromechanical Processes in an Asynchronous Traction Motor – Asynchronous Generator with Common Shaft Based on Field Model, AEEE, December 2015.
- [14] Chrástek, J.: Redukce ztrát netěsnostmi u vodárenských distribučních sítí. Voda Zlín 2007, Zlín: Zlínská vodárenská, a.s., 2007. ISBN 978-80-239-8740-9.
- [15] Pavlíšák P.: Úprava tlakových pomerov Bardejov – Vodojem Vimbarg I. Jihomoravská armaturka, s.r.o.
- [16] Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy. ČEZ Distribuce. [online]. 2010. [online]. [cit. 2020-11-13].
Dostupné z: www.cezdistribuce.cz/edee/content/file.../dodatek_1_2010_final_o.pdf
- [17] Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy. E.ON Distribuce. [online]. 2011. [online]. [cit. 2020-11-15].
Dostupné z: www.eon-distribuce.cz/file/cs/electricity/regulations/PPDS_2011_4.pdf
- [18] ČSN 33 3051. Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení. Praha: Český normalizační institut, 1992, 24 s.
- [19] Leyland, B.: Small hydroelectric engineering practice. Boca Raton: CRC Press, c2014. ISBN 978-1-138-00098-8.
- [20] Medvec, Z.: Ochrany a automatiky v rozvodu (Učební texty pro magisterské kombinované studium). Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007.
- [21] Zákon 165/2012 Sb. O podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. 2012.
- [22] Energetický regulační úřad: Energetický regulační věstník, 2019. [online]. [cit. 2021-1-30].
Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/5228943/ERV6_2019.pdf/7c470e71-3e3c-4f67-a6bd-5945852961d6.
- [23] Sequens, E.: Malé vodní elektrárny a životní prostředí. České Budějovice: Calla, 2009, ISBN 978-80-87267-05-9.

- [24] V. Giurgiutiu, S. E. Edward, *Micromechatronics: Modeling, Analysis, and Design with MATLAB*, Second Edition, CRC Press, 2008, ISBN 9781420065626.
- [25] P. Krause, O. Wasynczuk, S. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002. ISBN 0-471-14356-X.
- [26] S. E. Lishevski, *Electromechanical Systems and Devices* CRC Press, 2008. ISBN 9781420069723.
- [27] Pravidla provozování distribuční soustavy 2021 – Příloha č. 4. ČEZ Distribuce. [online]. 2021. [online]. [cit. 2021-3-8]. Dostupné z:
https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/ppds/ppds-2020_priloha-4.pdf
- [28] Crettenand, N.: *The Facilitation of Mini and Small Hydropower in Switzerland: Shaping the Institutional Framework (with a Particular Focus on Storage and Pumped-Storage Schemes)*. Lausanne: EPFL, 2012. DOI 10.5075/epfl-thesis-5356

Seznam publikací, projektů a účasti na soutěžích

Soupis publikací souvisejících s tématem disertační práce

Web of science:

[P1] Kral, M., Gono, R., Gono, M.: Implementation of small hydro power plants in water facilities, Proceedings of EPE 2019, IEEE 2019, 231-234, DOI: 10.1109/EPE.2019.8778101.

[P2] Kral, M., Gono, R.: Dynamic Model of Asynchronous Machine, Proceedings of EPE 2017, IEEE 2017, 152-155, DOI: 10.1109/EPE.2017.7967320.

[P3] Kral, M., Gono, R., Moldrik, P., Gono, M.: Quality Analysis of Electricity Supply from Small Hydro Power Plants with Banki and Pump Turbines, Proceedings of EPE 2015, IEEE 2015, 601-604, ISBN 978-1-4673-6787-5 DOI: 10.1109/EPE.2017.7967320.

Neindexované příspěvky:

[P4] Král, M., Goňo, R., Moldřík, P.: Analysis of the quality electricity supply by small hydropower stations. ELNET 2014 : 11th workshop, Ostrava, 25th November 2014, s. 36-43, ISBN 978-80-248-3663-8.

[P5] Král, M., Goňo, R.: Application for Facilitating the Selection of Water Turbine and Generator Protection Design of Small Hydro Power Plant. WOFEX 2015 : Ostrava, 8th September 2015, s. 43-48, ISBN 978-80-248-3787-1.

[P6] Král, M., Goňo, R.: Dynamic Model of Asynchronous Machine. ELNET 2015 : 12th workshop: Ostrava, 24th November 2015, s. 45-52, ISBN 978-80-248-3858-8.

[P7] Král, M., Goňo, R.: Comparison of Dynamic Models of Asynchronous Machines. ELNET 2016 : 13th workshop, Ostrava, 22th November 2016, s. 29-38, ISBN 978-80-248-4008-6.

[P8] Král, M., Goňo, R.: Electricity production by a small hydro power plant - statistical inference. WOFEX 2016 : Ostrava, 6th September 2016, s. 25-30, ISBN 978-80-248-3961-5.

[P9] Král, M., Goňo, R.: Comparison of dynamic model of asynchronous machine and real asynchronous machine. WOFEX 2017 : Ostrava, 12th September 2017, s. 31-36, ISBN 978-80-248-4056-7.

Soupis publikací nesouvisejících s tématem disertační práce

Neindexované příspěvky:

[P10] Baleja, R., Král, M.: Návrh biologicky optimalizovaného svítidla. Kurz osvětlovací techniky XXXII : 3. října - 5. října 2016, ISBN 978-80-248-3969-1.

Funkční vzorky:

Král, M., Goňo, R.: Chráníč zásuvek proti nebezpečnému doteku. Funkční vzorek, 2015, ev.č.: 037/29-06-2015_F.

Král, M., Goňo, R.: Měřicí zařízení fyzikálních veličin s dataloggerem. Funkční vzorek, 2016, ev.č.: 018/28-06-2016_F.

Král, M., Goňo, R.: Měřicí zařízení síly RF signálu. Funkční vzorek, 2016, ev.č.: 017/28-06-2016_F.

Král, M., Goňo, R.: Řídící jednotka se servopohonem. Funkční vzorek, 2016, ev.č.: 019/28-06-2016_F.

Software:

Král, M., Goňo, R.: Výběr vodní turbíny. Software, 2015, ev.č.: 014/29-06-2015_SW.

Výzkumné zprávy:

Sokanský, K., Novák, T., Baleja, R., Král, M., Hrbáč, R.: Biologicky optimalizované svítidlo. Souhrnná výzkumná zpráva, 2016, OSMONT, s.r.o..

Spoluúčast na řešení projektů:

SP2014/187 - Analýza spolehlivosti sítí a optimalizace využití OZE

SP2015/192 - Zajištění optimálního a spolehlivého provozu sítí s OZE

SP2015/73 - Kombinovaná výroba a akumulace energie pro CENET

SP2016/177 - Identifikace obrazců výbojové činnosti v izolačních systémech

SP2016/95 - Optimalizace elektrizační soustavy s on-grid OZE

SP2017/54 - Optimalizace energetického systému s alternativními zdroji

SP2018/61 - Provoz distribučních sítí s OZE

Účast na soutěžích:

Cena Nadace ČEZ 2017: 1. místo v soutěži o nejlepší vysokoškolský vědeckotechnický projekt: Chráníč zásuvek proti nebezpečnému doteku

Seznam obrázků

<i>Obr. 1 – Podíly na výrobě elektrické energie v ČR [3]</i>	11
<i>Obr. 2 - Vývoj výroby elektřiny brutto (GWh) [3]</i>	12
<i>Obr. 3 - Podíl kategorií na brutto výrobě [3]</i>	13
<i>Obr. 4 – Vývoj výroby elektřiny brutto VE v GWh [3]</i>	13
<i>Obr. 5 - Vývoj instalovaného výkonu VE v MW [3]</i>	13
<i>Obr. 6 – Členění turbín podle způsobu přenosu energie [6]</i>	17
<i>Obr. 7 – Rozdělení turbín podle průtoku oběžným kolem [6]</i>	19
<i>Obr. 8 - Příklad oblastního diagramu Francisových turbín [6]</i>	20
<i>Obr. 9 - Rámcový oblastní diagram vodních turbín [6]</i>	20
<i>Obr. 10 - Rozdělení vodních elektráren podle výkonu [6]</i>	21
<i>Obr. 11 - Oběžné kolo Peltonovy turbíny [19]</i>	23
<i>Obr. 12 - Skládané oběžné kolo Peltonovy turbíny [6]</i>	23
<i>Obr. 13 - Principiální schémata řešení Bánkiho turbíny [6]</i>	24
<i>Obr. 14 - Tvary oběžných kol Francisových turbín [6]</i>	25
<i>Obr. 15 - Zařízení pro natáčení lopatek Kaplanovy turbíny [6]</i>	26
<i>Obr. 16 - Oběžné kolo Kaplanovy turbíny v různých polohách [6]</i>	26
<i>Obr. 17 - Přímoproudá turbína s obtékaným generátorem [6]</i>	27
<i>Obr. 18 - Přímoproudá turbína s vnějším generátorem [6]</i>	27
<i>Obr. 19 - Přímoproudá turbína s vnějším generátorem, řetězovým a ozubeným převodem [6]</i>	28
<i>Obr. 20 - Dériázova turbína pro elektrárnu Mikšová (Slovensko) [6]</i>	29
<i>Obr. 21 - Gravitační systém zásobování vodou [9]</i>	31
<i>Obr. 22 - Kombinace gravitačního a výtlačného systému zásobování vodou [9]</i>	31
<i>Obr. 23 – Tlaková pásma tvořená vodojemy [9]</i>	33
<i>Obr. 24 – Tlaková pásma tvořená redukčním ventilem na potrubí [9]</i>	34
<i>Obr. 25 – Tlaková pásma tvořená čerpacími stanicemi [9]</i>	34
<i>Obr. 26 – Gravitační přívodní potrubí s přerušením tlaku v přerušovací komoře [9]</i>	35
<i>Obr. 27 - Pohled na soustrojí MVE Vyšní Lhoty</i>	44
<i>Obr. 28 – Ukázky možných umístění regulačních armatur [11]</i>	44
<i>Obr. 29 – Návrh možných míst umístění MVE ve vodovodním systému</i>	46
<i>Obr. 30 – Přehled průtoků přivaděčem v měřeném období</i>	46
<i>Obr. 31 – Přehled tlaků na konci přivaděče v měřeném období</i>	47
<i>Obr. 32 – Četnost průtoků přivaděčem ve vybrané lokalitě</i>	47
<i>Obr. 33 – Doporučený typ turbíny ve vybrané lokalitě</i>	48
<i>Obr. 34 – Doporučení ochran asynchronního generátoru ve vybrané lokalitě</i>	49
<i>Obr. 35 - Připojení výroby elektrické energie na napěťovou hladinu nn [27]</i>	51
<i>Obr. 36 – Změna účinnosti turbíny při změně provozních otáček [12]</i>	54
<i>Obr. 37 – Titulní strana pomocné aplikace</i>	54
<i>Obr. 38 – Zobrazení strany s vstupy pomocné aplikace</i>	55
<i>Obr. 39 – Zobrazení doporučené turbíny MVE pomocnou aplikací</i>	56
<i>Obr. 40 - Zobrazení zařazení MVE dle výkonu pomocnou aplikací</i>	57
<i>Obr. 41 – Ukázka asynchronního stroje [6]</i>	59
<i>Obr. 42 – Ukázka synchronního stroje [6]</i>	60

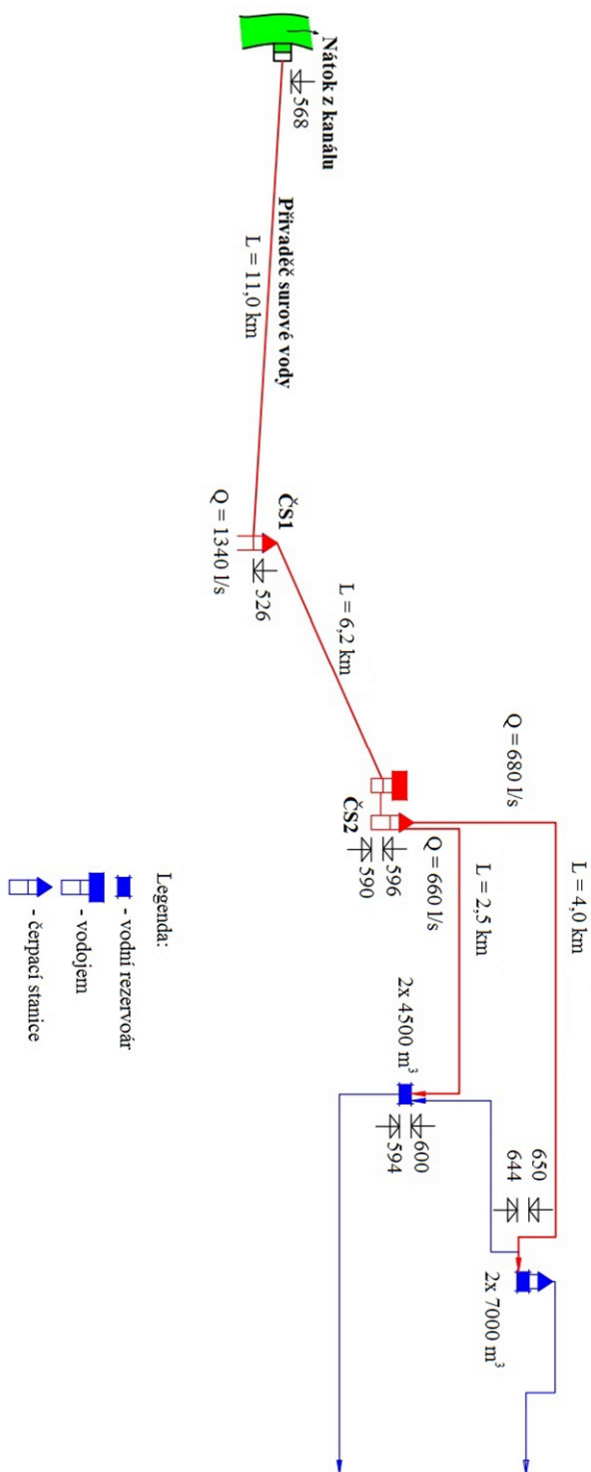
<i>Obr. 43 – Popis třífázového symetrického indukčního stroje [24]</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 44 – Zjednodušený model statorového a rotorového vinutí třífázového indukčního stroje [24]</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 45 – Výsledný dynamický model asynchronního motoru s kotvou nakrátko</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 46 – Schéma zapojení pro test nezatíženého motoru</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 47 – Schéma zapojení pro DC test pro získání odporu statorového vinutí</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 48 – Schéma zapojení pro test motoru se zablokovaným rotorem [25], [26]</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 49 – Porovnání simulace a měření statorového proudu</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 50 - Porovnání simulace a měření točivého momentu</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 51 - Porovnání simulace a měření otáček</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 52 - Porovnání simulace a měření skluzu</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 53 – Úniky v distribučních systémech [14]</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 54 - Příklad systému chránění MVE s asynchronním generátorem a kompenzačním rozvaděčem [20]</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 55 – Doporučení ochran pro MVE pomocnou aplikací</i>	<i>79</i>

Seznam tabulek

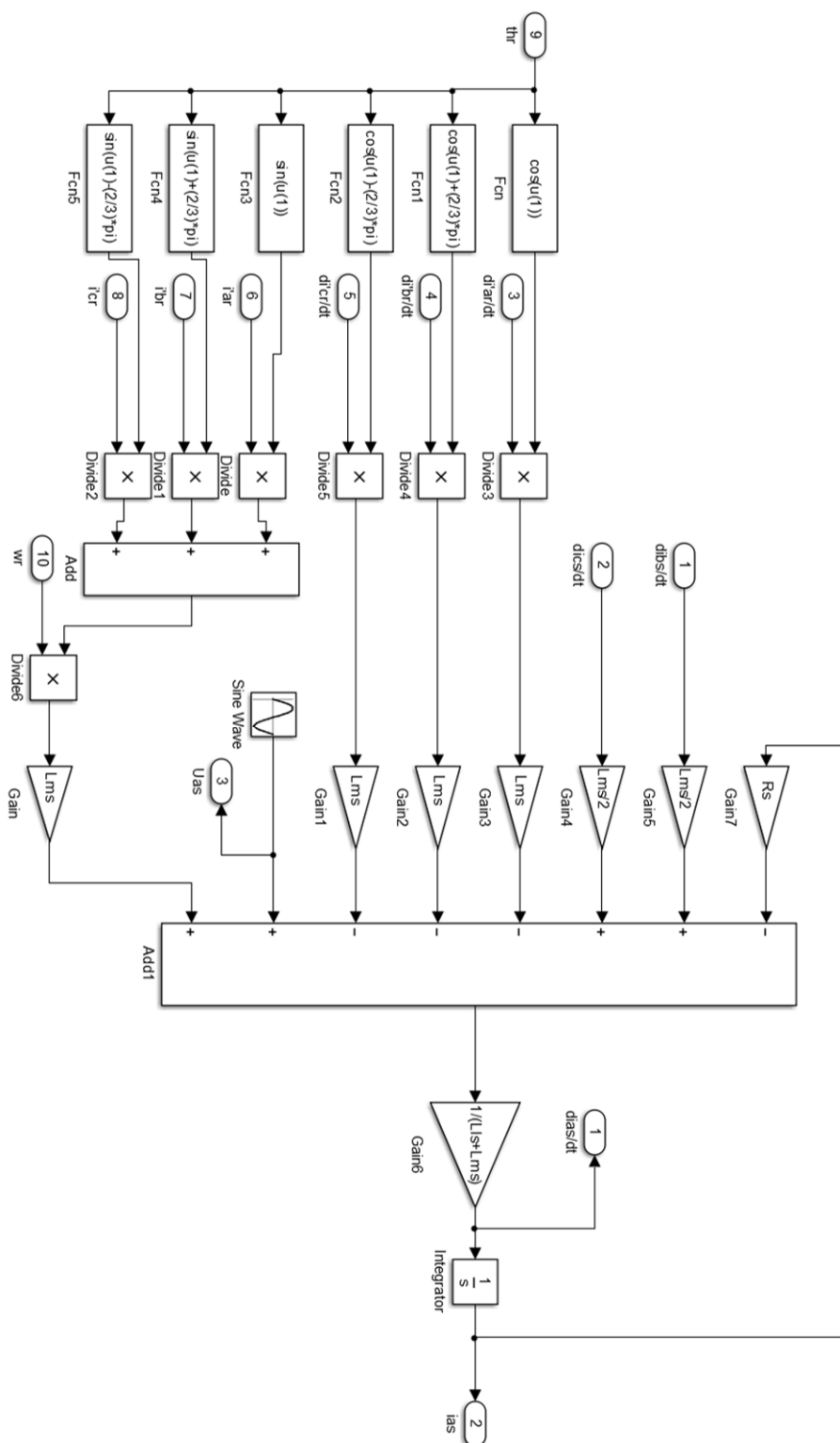
<i>Tab. 1 – Přehled roční bilance elektřiny dle kategorií VE [3]</i>	<i>12</i>
<i>Tab. 2 – Výroba brutto elektřiny v GWh [3]</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 3 – Brutto spotřeba v GWh [3]</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 4 - Výkupní ceny a roční zelené bonusy na elektřinu pro malé vodní elektrárny [21]</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 5 - Současné mezní parametry vodních turbín [7]</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 6 – Uzavírací a regulační armatury [9]</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 7 – Vzorek porovnávaných MVE s pomocnou aplikací</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 8 – Štítkové parametry asynchronního motoru Siemens 1LE10021AB422AB0</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 9 – Parametry popisující asynchronní motor Siemens 1LE10021AB422AB0</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 10 - Nastavení ochran neselektivně vypínaných jednotek, ČEZ [16]</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 11 - Nastavení ochran neselektivně vypínaných jednotek s f. proudy do 16 A, ČEZ [16]</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 12 - Nastavení ochran rozpadového místa, ČEZ [16]</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 13 - Nastavení ochran neselektivně vypínaných jednotek, E.ON [17]</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 14 - Nastavení ochran neselektivně vypínaných jednotek s f. proudy do 16 A, E.ON [17]</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 15 - Nastavení ochran rozpadového místa [17]</i>	<i>78</i>

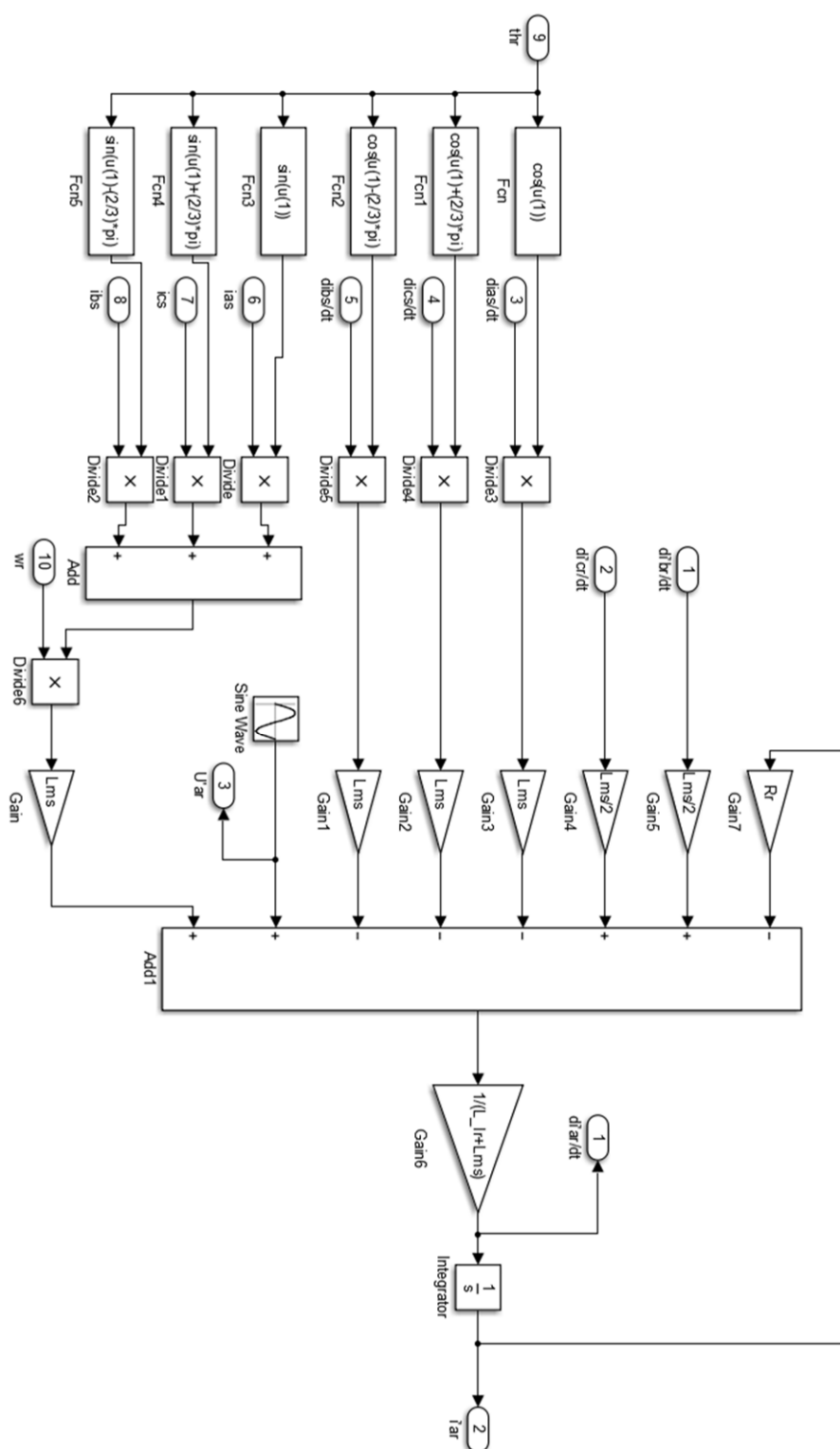
Seznam příloh

Příloha A – Schéma vodovodního řádu

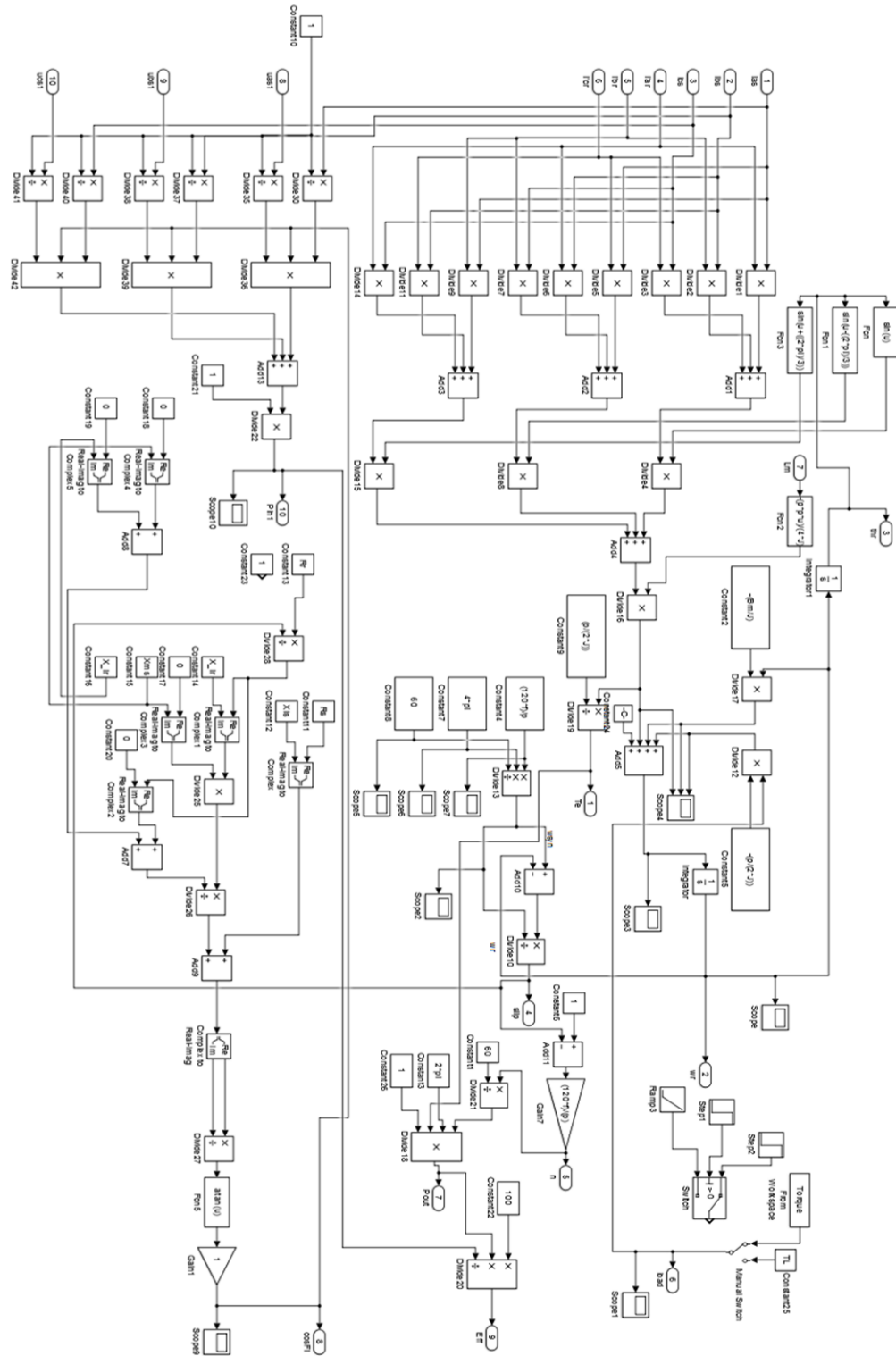


Příloha B - Schéma subsystému pro výpočet statorového proudu i_{as}



Příloha C - Schéma subsystému pro výpočet rotorového proudu i'_{ar} 

Příloha D - Schéma subsystému pro výpočet výstupních dat modelu



Příloha E - Schéma modelu pro simulaci asynchronního stroje

